

薄互层地震 反射特征研究

张玉芬 著



中国地质大学出版社

登录号	196564
分类号	P 315.02
种次号	002

中国地质大学学术著作出版基金
石油天然气总公司“九五”重点科技攻关项目 资助

薄互层地震反射特征研究

张玉芬 著



石油大学 0205932

中国地质大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

薄互层地震反射特征研究/张玉芬著. —武汉:中国地质大学出版社,2002.10
ISBN 7-5625-1723-1

- I. 薄…
- II. 张…
- III. 薄互层-地震反射-研究
- IV. P315.03

薄互层地震反射特征研究		张玉芬 著
责任编辑:高勇群	技术编辑:阮一飞	责任校对:张咏梅
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 31 号)		邮编:430074
电话:(027)87482760	传真:87481537	E-mail: cbo @ cug. edu. cn
经 销:全国新华书店		
开本:787 毫米×1092 毫米 1/16	字数:190 千字 印张:7.5 插页:2	
版次:2002 年 10 月第 1 版	印次:2002 年 10 月第 1 次印刷	
印刷:中国地质大学出版社印刷厂		
ISBN 7-5625-1723-1/P · 588		定价:20.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

由于我国东部的绝大多数中、新生代陆相含油盆地大都以薄层砂、泥岩沉积为主,地层岩性和厚度在横向上变化均较大,因此,从理论上对影响砂泥岩薄互层组地震反射特征因素进行分析研究,将对我们定性或定量求取薄互层组中各单层厚度、薄互层组的厚度,预测薄储层的空间展布规律,野外采集高分辨率地震资料有一定的理论和现实意义(张玉芬、熊维纲,1993;张玉芬、熊维纲,1994)。

反演是地球物理工作所要解决的一个核心问题,根据观测数据和相应的地球物理参数(王家映,1986; Parker, 1977)之间的函数关系是线性还是非线性,一般把反演方法分为线性反演和非线性反演两大类。目前线性反演方法较为成熟,已有严格的理论分析和一整套行之有效的求解方法(欧登伯格、王家映,1984; Levy and Clowes, 1980)。但由于绝大多数地球物理问题都为非线性问题,用常规的线性反演方法求解非线性反演问题往往得不到正确的解,即使采用迭代改进的方法,也难求得正确的解,故目前有很多地球物理工作者正致力于非线性反演问题的研究,尤其是近年来完全非线性反演方法的研究取得了明显的突破,出现了许多现实的反演方法,例如,以统计物理学为基础的模拟退火法、以生物工程为基础的遗传算法、以人工智能为基础的人工神经网络法等。实践表明,非线性反演方法明显优于各种线性反演方法(姚姚, 1996),但非线性反演方法也有一个共同的缺点,即计算量大,难以运用于常规生产处理(Albert 等, 1990)。因此本书提出一种“测井资料和地震资料(书中简称为井震资料)联合地震道多尺度反演”方法,其基本思想就是想用求解线性反演方法来求解非线性反演问题,以减少计算工作量。用测井资料、地质资料和地震资料共同联合进行反演以提高反演的精度和可信度;同时,利用多尺度反演克服局部极值影响,达到搜索全局最小极值点的目的。多尺度反演是把目标函数分解成不同尺度的分量,根据不同尺度上目标函数的特征逐渐搜索全局最小点,这种做法的优点是:在大尺度上,一般反演稳定(因此频段地震资料的信噪比较高,目标函数的极值点少且分得开),用通常的方法就很容易直接或经比较搜索出大尺度(总体背景)上的“全局极值点”;同时反演结果受选定的初始点的影响较小,从而减小了其后的反演落入错误邻域的可能性,并且可加快收敛速度。

本书将广义线性反演方法与小波分析的多尺度思想相结合,将测井资料、地震资料在地质理论指导下有机组合,建立一个分辨率较高的初始反射系数模型剖面,并利用小波变换的多尺度思想由信噪比较高的大尺度或低频分量向高频方向进行迭代反演。将多尺度反演思想用于地震资料处理虽然早已有人做过(Carey 等, 1995; 杨忠民、黄大云, 1994; 韩世勤、张玉芬,

1996;何光明等,1996;高静怀等,1997;李锦飞、李人厚,1998;李鲲鹏等,1997;赵改善,1994;何光明、高如曾,1995;吴爱第、牟永光,1997;侯遵泽,1998),但将测井、地震资料联合进行地震道多尺度反演在国内尚属首次,具有一定的创新性。实际资料试算的结果表明,该反演方法不失为目前进行地震道反演的一个较好的反演方法。

笔者在书中对影响薄互层地震反射特征的因素进行了详细的讨论分析和研究,较全面系统地总结了薄互层的厚度、薄互层中单层厚度、子结构厚度、薄互层的互层数、入射子波的类型、主频、衰减系数以及地震勘探的采样率等参数对薄互层地震反射特征的影响规律;导出了求取薄互层的单层厚度、子结构厚度的半定量公式;提出了进行目标勘探的思想,这一思想对目前开展的高分辨率地震勘探的野外采集具有一定的理论和现实意义。

另外,在利用地震道反演结果(看作为近似反射系数序列)进行波阻抗反演时,笔者首次提出利用测井资料作为约束条件,通过扫描方法来求取波阻抗初值的思想,并成功地应用于实际资料的处理,取得了满意的结果。这一思想和做法比较好地解决了在波阻抗反演中长期以来因其初值求不准而影响波阻抗反演精度的问题。这也是本书的特色之一。

本书得到了罗延钟教授、熊维纲教授、詹正彬教授、王家映教授、姚姚教授、潘玉玲教授、刘天佑教授、周鸿秋教授、周远田教授等的指导和帮助,他们对本书的内容、编写提供了许多宝贵的和建设性的指导意见。书中许多实际资料来自中原油田原物探公司等生产和研究单位。此外,李长安、朱成宏、凌峰等同志也在著作的完成过程中给予过帮助,在此一并表示诚挚的谢意!

限于笔者水平,书中一定存在许多缺点、疏漏和错误,敬请各位专家、同行和读者批评指正。

笔 者

2002年5月于武汉

目 录

第一章 薄互层介质的地质和地球物理特征.....	(1)
第一节 薄互层介质的地质特征.....	(1)
第二节 薄互层介质的地球物理特征.....	(2)
一、地震薄层	(2)
二、薄层的干涉效应	(2)
三、薄互层的地震地质模型	(3)
第二章 薄互层介质地震反射波特征分析.....	(6)
第一节 薄互层介质的反射系数序列振幅谱的特点.....	(6)
一、两种介质等厚薄互层组	(6)
二、不等厚薄互层组	(8)
三、有序递变薄层组.....	(11)
四、实际地层的反射系数序列谱特点.....	(13)
第二节 影响薄互层地震反射波特征因素分析	(15)
一、薄互层的单层厚度或子结构厚度对薄互层反射波特征的影响.....	(16)
二、薄互层的互层数 N 对薄互层地震反射波特征的影响	(18)
三、子波主频对薄互层组地震反射波特征的影响.....	(19)
四、子波衰减系数对薄互层反射波特征的影响.....	(27)
五、采样率对薄互层地震反射波特征的影响.....	(34)
第三节 薄互层地震反射特征小结	(34)
第三章 常用地震道反演方法概述	(37)
第一节 地震道线性褶积模型及表示方式	(37)
一、地震道线性褶积模型的建立.....	(37)
二、地震道褶积模型的不同表示形式.....	(38)
第二节 部分地震道反演方法概述及比较	(39)
一、直接法.....	(40)
二、迭代法.....	(42)
第三节 本书反演方法的选取	(45)
第四章 提高薄互层地震资料分辨率反演方法研究	(47)
第一节 小波变换和多尺度分解的基本原理	(47)
一、小波变换基本原理.....	(48)
二、小波变换多尺度分析及 Mallat 算法	(49)
第二节 测井资料和地震资料联合地震道反演	(51)
一、测井、地震资料联合地震道反演的基本原理	(51)
二、测井、地震资料联合地震道反演的实现	(53)

第三节	测井、地震资料联合地震道多尺度反演.....	(54)
一、二进小波域中的褶积模型.....		(54)
二、地震道多尺度反演的基本原理.....		(55)
三、地震道多尺度反演的实现.....		(56)
四、多尺度反演方法逐尺度提高分辨率的理论分析.....		(57)
第四节	提高测井、地震资料联合地震道多尺度反演效果的辅助处理.....	(58)
一、利用小波变换多尺度思想提高地震数据的信噪比和分辨率.....		(58)
二、利用多项式拟合技术提高反演剖面的信噪比和分辨率.....		(60)
第五章	高精度薄互层地震波阻抗和层速度剖面求取方法研究	(65)
第一节	波阻抗反演方法简介和波阻抗的计算	(65)
一、波阻抗反演方法简介.....		(65)
二、波阻抗剖面的计算.....		(65)
第二节	高精度薄互层地震波阻抗剖面求取方法研究	(67)
一、常规波阻抗初值 Z_0 的确定及局限性		(67)
二、井约束扫描求取 Z_0 值的基本原理和实现步骤		(67)
三、方法验证和效果分析.....		(68)
第三节	高精度薄互层地震层速度剖面求取方法研究	(74)
第六章	实例及影响反演结果的因素分析	(77)
第一节	实际资料的处理-实例分析.....	(77)
第二节	反演效果分析	(87)
第三节	影响井震联合地震道多尺度反演结果的因素分析	(94)
一、初始模型的质量对反演结果的影响.....		(94)
二、原始地震道数据质量对反演结果的影响.....		(94)
三、地震子波的类型、主频等参数对反演结果的影响		(95)
四、小波函数的类型、长度对反演结果的影响		(95)
五、多尺度反演最大分解尺度和起始分解尺度对反演结果的影响.....		(99)
六、反演迭代的次数和阈值对反演结果的影响		(100)
七、波阻抗初值 Z_0 对最终波阻抗反演结果的影响.....		(100)
结 论.....		(101)
Abstract		(103)
参考文献.....		(109)
附 图.....		(112)

第一章 薄互层介质的地质和地球物理特征

目前我国东部的石油勘探工作已进入精细勘探阶段,如何确定陆相地层中薄储层的空间展布规律及其性质已成为一个亟待解决的问题,由于我国东部的绝大多数中、新生代陆相含油盆地大都以薄层砂、泥岩沉积为主,夹有少量薄层碳酸盐岩、页岩及膏盐层,地层岩性和厚度横向变化均较大,而且这些地层的厚度远远低于常规地震勘探的垂向分辨率,因此,从理论上研究砂泥岩薄互层地震反射特征、薄互层组内的单层厚度、子结构厚度、互层组内层数、入射子波类型、主频、采样率等各种因素对反射波特征的影响,将对我们定性或定量求取薄互层组中各单层厚度或薄互层组的厚度、预测薄储层的空间展布规律有一定的理论和现实意义。

第一节 薄互层介质的地质特征

为了了解薄互层的地质特征,笔者对某油田的若干口钻井(W325井、XW12井、PS12等井)的测井曲线和岩性资料进行了分析研究。研究发现:W325井揭示除作为储层的粉砂岩外,还有盐岩、泥岩、页岩、含膏盐、软泥等诸多岩性地层,在3 324~3 500m井段粉砂岩储层为多层储油层,但在它以南约23km的XW12井在同样深度上,储油层很快相变成盐岩和泥岩互层。PS12井所揭示的储层较深,粉砂岩储层约在4 100~5 000m,主要以粉砂岩及泥岩互层为主。从地震勘探角度来说,凡有岩性差异的物性界面均为地震地层界面,同一波阻抗层即为一个地震层位。据此笔者对上述三口井某深度内的地震地层进行了统计(见表1-1)。在总计的554个地层中,地层厚度小于12m的薄层为496个,占总地层层数的89.5%,厚度小于5m的

表 1-1 W325、XW12、PS12 井地层厚度统计表

厚度个数 井	单层厚度 (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	总计 (层数)
W325(2 631~3 500m)		12	42	25	18	11	13	6	4	5	5	5	
XW12(2 631~3 820m)		64	61	33	27	17	14	12	8	3	8	1	
PS12(4 100~5 000m)		7	21	13	6	15	8	9	2	4	5	3	
厚度个数 井	单层厚度 (m)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	总计 (层数)
W325(2 631~3 500m)		1	7	1	2	0	2	0	0	0	0	0	
XW12(2 631~3 820m)		7	4	1	4	0	0	2	0	1	0	0	
PS12(4 100~5 000m)		1	5	3	2	3	2	0	2	0	2	1	
厚度个数 井	单层厚度 (m)	23	24	25	26	27	28	29	30	31			总计 (层数)
W325(2 631~3 500m)		2	0	0	2	0	0	0	0	0			164
XW12(2 631~3 820m)		0	0	0	0	0	0	0	0	1			271
PS12(4 100~5 000m)		0	0	1	1	0	1	1	1	0			119

超薄层为 372 个, 占总地层层数的 67%。由此可见, 我国东部油区的薄互层地层的地质特征为:

(1) 大多数地层为低于目前地震勘探分辨率的薄层或超薄层。

(2) 地层在横向上相变剧烈, 从地震勘探角度说, 意味着它们所响应的地震波场(包括振幅、频率、极性、速度及波阻抗等参数)在横向上有变化。

(3) 地层结构具有多种类型。既有盐泥互层、砂泥互层、泥页互层等韵律结构, 亦有岩性渐变的递变型结构, 它正好响应地震薄层的两种基本类型。因此反映地层结构的地震反射系数时间序列可归为两种表示形式, 一是正、负反射系数相间的序列, 二是反射系数大小渐变的序列。

第二节 薄互层介质的地球物理特征

一、地震薄层

在地震勘探中, 薄层的概念是相对的。因为地震勘探中定义薄层是以它的纵向分辨率为依据的, 即对地震子波而言, 不能分辨出地层顶、底板反射的地层称为薄层。由于地震子波具有不同的频率、不同的延续度、不同的波长等, 因此薄层厚度的概念是相对的, 可以从不同的角度来定义薄层的厚度。通常我们定义厚度 Δh 满足下列不等式的地层称为薄层

$$\Delta h < \lambda/4 \quad \text{或} \quad 2\Delta h < \lambda/2 \quad (1-1)$$

式中, λ 是谐和振动的波长或脉冲波的视波长。不等式两边除以波传播的速度 v , 则上式变为

$$\frac{2\Delta h}{v} < \frac{\lambda}{2v} \quad \text{或} \quad \tau < \frac{T}{2} \quad (1-2)$$

式中, τ 表示波在薄层内传播的双程旅行时间, T 是谐和振动的周期或脉冲波的视周期。于是薄层亦可定义为地震波在该层内传播的双程旅行时小于波的半个周期或半个视周期的那种层。假设地层速度为 $2500\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 频率 $f=25\text{Hz}$, 则 $\Delta h < \lambda/4$ 为 25m, 即此时地震勘探所能分辨的最薄地层厚度为 25m, 因此, 由表 1-1 中测井资料统计地层厚度均远远小于 25m, 由此可见, 在我国东部陆相地层发育区, 绝大多数地层都为薄层或超薄层地层。

二、薄层的干涉效应

若有一平面谐和纵波 P_1 垂直投射至薄层顶板时, 在该面上产生反射波 P_{11} 、透射波 P_{12} 。透射波 P_{12} 在薄层底板上产生的反射波 P_{122} 又可在薄层内返回至薄层顶板上产生反射波 P_{1222} , 甚至由 P_{1222} 又可形成 P_{12222} 等波, 如图 1-1 所示。在薄层内形成的这些反射波, 在地震勘探中称为多次反射波。这些多次反射波透过薄层顶板成为 P_{122221} 、 $P_{1222221}$ 等诸波, 它们均可在地面上被接收到(注意: 为了清晰起见, 图 1-1 中所画的射线已将垂直投影的射线在图上沿水平方向画成斜线)。根据薄层定义, 薄层内诸多次波必定和薄层的一次波 P_{1221} 在地面上相互叠加(因为在薄层内多次反射波的双程旅行时 τ 小于一次波的 $1/2$ 周期), 亦即当地面上接收到薄层的一次波后, 它的振动尚未停止, 多次波即到达, 在地面上接收到的是这些波相互叠加的总振动。这种一次反射波同薄层内多次反射波的相互叠加干涉产生的效应称为薄层的干涉效应。

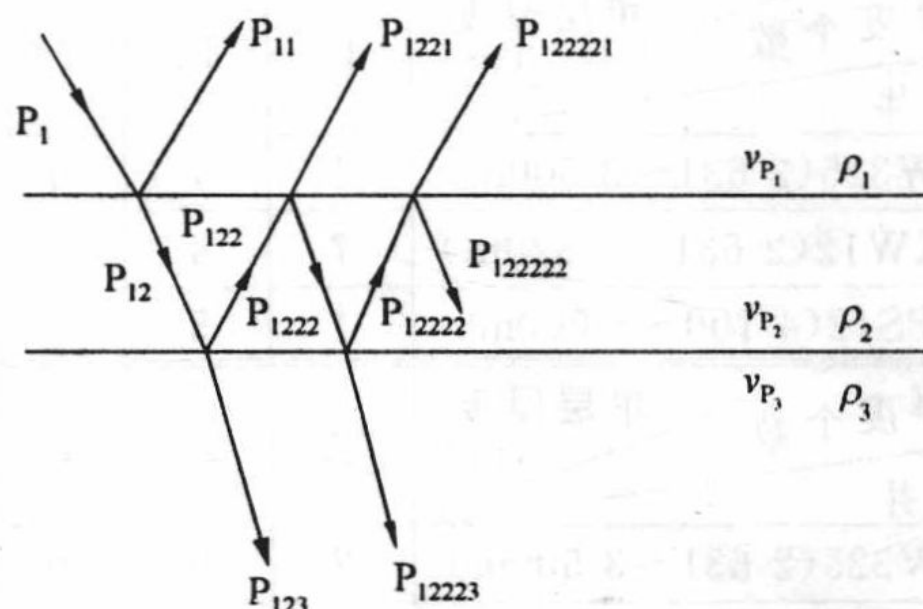


图 1-1 薄层的物理模型

应。如果薄层的顶板反射波 P_{11} 的振幅用 A_{11} 表示,通过薄层在其底板的一次反射波和多次反射波叠加的总振动用 P'_{11} 表示,其振幅为 A'_{11} ,则它们的相对振幅值 $\frac{A'_{11}}{A_{11}}$ 反映了经过薄层反射后的能量变化。经计算得

$$\frac{A'_{11}}{A_{11}} = \left[\frac{1 - 2(b - \delta) \cos 2\pi f \tau + (b - \delta)^2}{1 - 2b \cos 2\pi f \tau + b^2} \right]^{1/2} \quad (1-3)$$

式中, f 为谐波频率,而

$$\delta = \frac{4z_1 z_2 (z_3 - z_2)}{(z_2 - z_1)(z_3 + z_2)(z_2 + z_1)}$$

$$b = \frac{(z_1 - z_2)(z_3 - z_2)}{(z_1 + z_2)(z_3 + z_2)}$$

式中, z_1, z_2, z_3 分别为层状介质第 1、第 2、第 3 地层的波阻抗。从上面的公式可以看出,经过薄层反射后的复合振动的振幅与 $f, \tau, \Delta h$ 有关,因为

$$f\tau = \frac{\tau}{T} = \frac{2\Delta h}{T_v} = \frac{2\Delta h}{\lambda} \quad (1-4)$$

当薄层厚度一定时, A_{11} 与频率 f 有关,说明谐波通过薄层反射后表现出振幅频率特性。图 1-2A 给出了韵律型薄层(地层参数为: $z_1 < z_2 > z_3$ 或 $z_1 > z_2 < z_3$) 的频率特性曲线,图 1-2B 给出了递变型薄层(地层参数为: $z_1 < z_2 < z_3$ 或 $z_1 > z_2 > z_3$) 的频率特性曲线。从图 1-2 可以看出,韵律型薄层压抑低频成分等波,相当于一个高通滤波器;而递变型薄层相对地压制了高频,低频成分得到加强,好似一个低通滤波器。薄层的滤波特性亦进一步说明了大地的滤波作用。另外,由公式(1-3)知,薄层的振幅特性还是 $2\Delta h/\lambda$ 的函数,说明薄层厚度如果有横向变化时,薄层的振幅特性也会发生变化,因此不同地段的反射波形亦不一致。

图 1-3 给出了两个反射层上反射波的相互干涉情况。图左侧用波长(λ)表示地层的相对厚度(Δh)。当层厚等于一个波长时($\Delta h/\lambda = 1$),顶、底板反射波是相互分开的, $\Delta h/\lambda$ 小于 1 以后,两个

反射波相互干涉。由于薄层的干涉现象或者说薄层的振幅频率特性,使我们在地面接收到经过薄层和薄互层的反射波(相互叠加后的结果),分辨率明显地降低,致使用常规的地震勘探方法已无法分辨出地下的地层。这也是目前地震勘探所面临的一个亟待解决的问题,因此,从理论上研究影响薄互层地震反射波特征的因素及影响规律具有重要的意义。

三、薄互层的地震地质模型

在某一深度范围内的一个地震薄层组,可以认为它们的沉积环境及压实等效应是相同的,亦即在该薄层组内相同岩性的地层具有相同的地震特性,如薄层组内的粉砂岩具有相似的速度、密度、波阻抗等特性。于是从地层的厚度来说,地震薄互层模型可分为等厚和不等厚两类;从地层的结构来说,可分为韵律型和递变型两类。任何一种地震薄互层模型都包含在上述两种

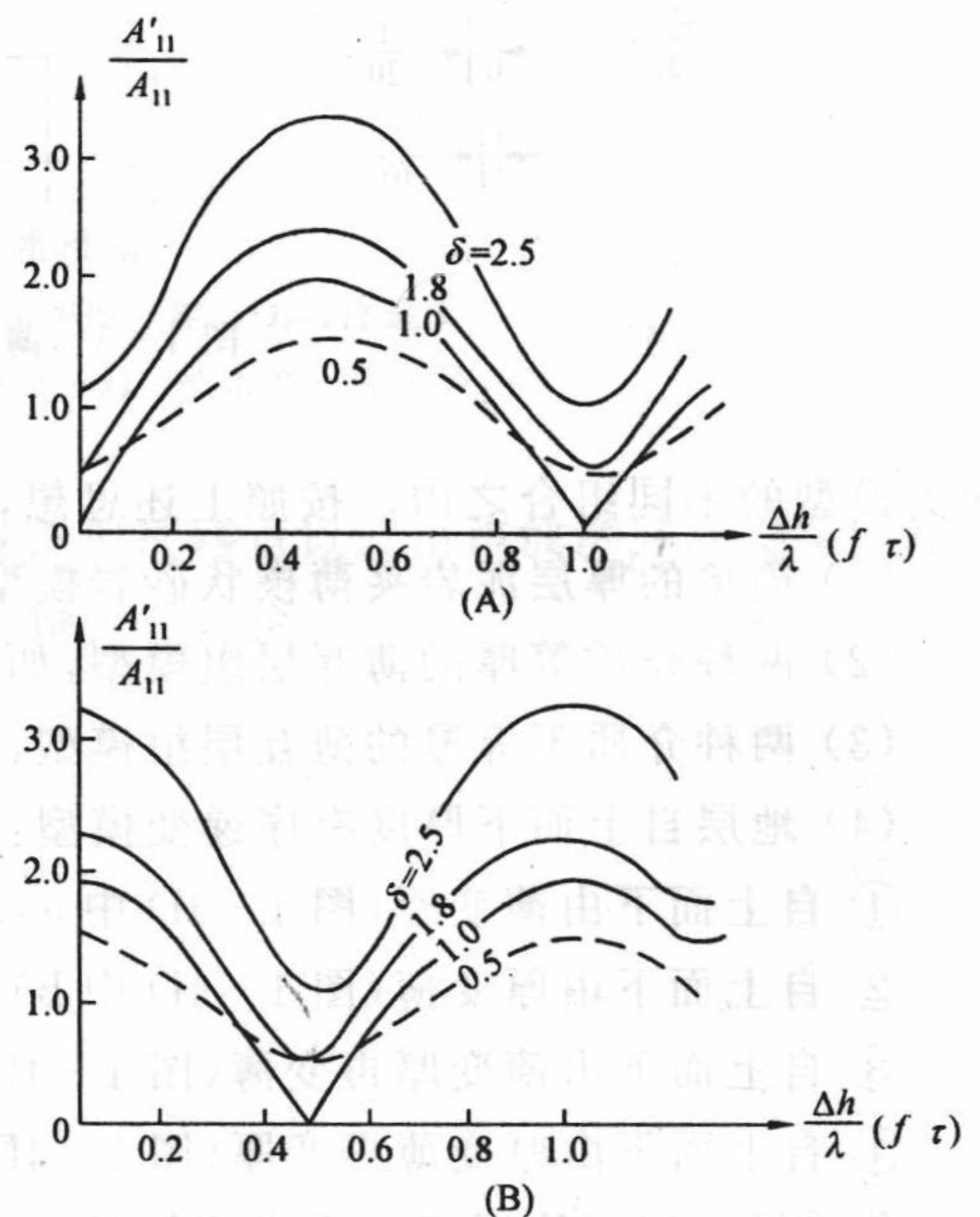


图 1-2 薄层频率特性曲线

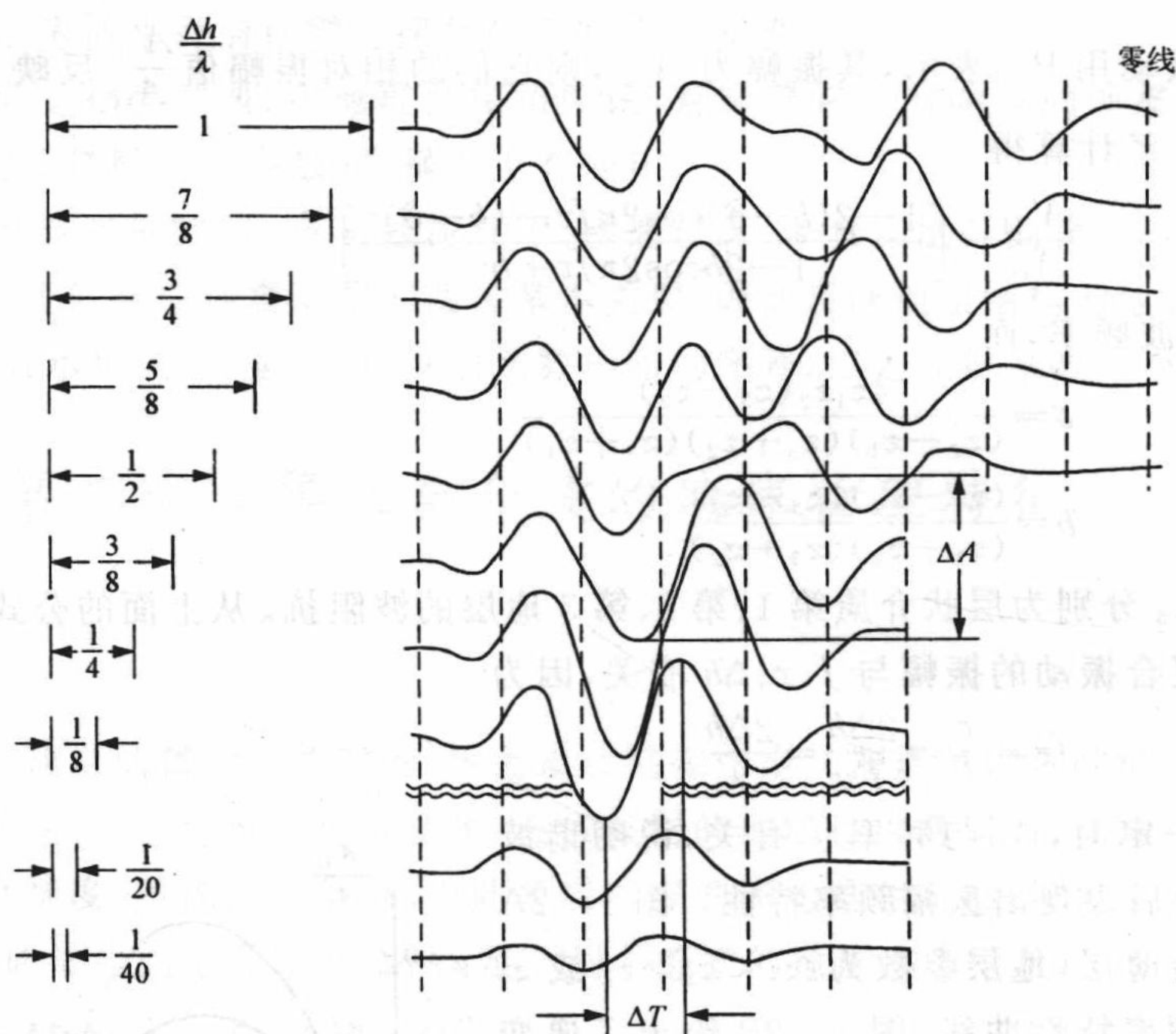


图 1-3 薄层干涉的分辨率研究

四类模型的不同组合之内。按照上述思想,本书设计了以下几种薄互层的地震地质模型:

- (1) 简单的厚层泥岩夹薄楔状砂岩模型,如图 1-4A;
- (2) 两种介质等厚的薄互层组模型,如图 1-4B;
- (3) 两种介质不等厚的薄互层组模型,如图 1-4C;
- (4) 地层自上而下厚度有序递变模型:
 - ① 自上而下由薄变厚(图 1-4D 中 a);
 - ② 自上而下由厚变薄(图 1-4D 中 b);
 - ③ 自上而下由薄变厚再变薄(图 1-4D 中 c);
 - ④ 自上而下由厚变薄再变厚(图 1-4D 中 d)。

若单层地层厚度以双程垂直旅行时 $\Delta t (\Delta t = 2h/v)$ 表示,砂岩速度取 $3500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,泥岩速度取 $2500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,密度 ρ 不变,这时反射系数可简化为:

$$r_i = (v_{i+1} - v_i) / (v_{i+1} + v_i) \quad (i=1, 2, 3 \cdots n+1)$$

对于图 1-4 所示的两种介质(砂岩和泥岩)等厚互层的地质模型假设其层速度分别为 v_2 和 v_1 ;且从浅到深速度不变,那么该地质模型的反射系数序列可表示为:

$$f(k) = (r, -r, r, -r \cdots) \quad (1-5)$$

当设波在各层中传播时间为 $t(i) (i=1, 2 \cdots N)$, N 为层数,则第 i 层顶部的反射时间为:

$$\tau(i) = \sum_{j=1}^{i-1} t(j) \quad (1-6)$$

由该模型建立的理想的地震记录可表示为:

$$s(i) = \sum_{j=1}^N r(j) b(i - \tau(j) + 1) \quad (i = 1, 2 \cdots N_{\text{samp}}) \quad (1-7)$$

式中, s 为地震信号, i 为记录样点序号, N_{samp} 为采样点数, b 为地震子波, r 为地层反射系数。

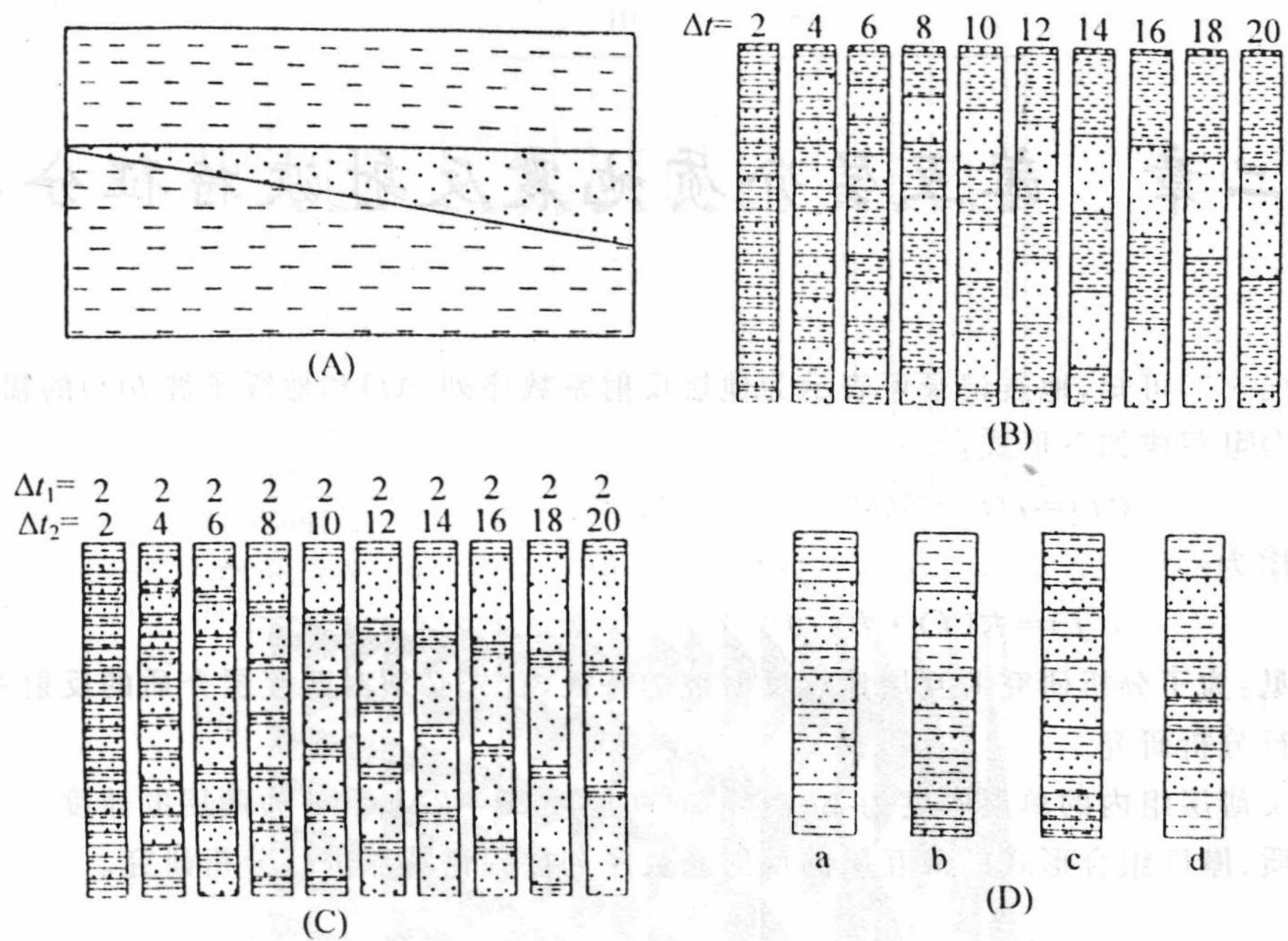


图 1-4 地震地质模型

A: 楔状 B: 等厚互层 C: 两种介质不等厚互层 D: 有序递变
a: 由薄→厚 b: 由厚→薄 c: 由薄→厚→薄 d: 由厚→薄→厚

在下面的第二章中主要对上述各种模型的地震反射波特点以及由声波测井获得实际地震反射波特点及各种因素对地震反射波特点的影响规律进行讨论。

第二章 薄互层介质地震反射波特征分析

由式(1-7)可知,地震记录可表示为地层反射系数序列 $r(t)$ 和地震子波 $b(t)$ 的褶积结果,即式(1-7)可写成如下形式:

$$s(t) = r(t) * b(t)$$

其相应的谱为:

$$S(f) = R(f) \cdot B(f)$$

由上式可见:为了分析研究薄互层地震反射波的特征,首先必须对薄互层介质的反射系数序列的特点进行分析研究。

如定义薄层组内的单层厚度为 Δh ,它的时间厚度 $\Delta t = 2\Delta h/v$, v 为薄层的速度。下面分别对不同介质、厚度组合形式的薄互层的反射系数序列振幅谱特点进行分析研究。

第一节 薄互层介质的反射系数序列振幅谱的特点

一、两种介质等厚薄互层组

等厚薄互层的反射系数时间序列可视为谐和线段离散序列,它的反射系数序列可表示为公式(1-5)形式,其相应的频谱为:

$$\begin{aligned} F(2\pi f) &= r \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot e^{-i2\pi f(k-1)\Delta t} \\ &= r \left[1 - \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot \cos(2\pi f k \Delta t) + i \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot \sin(2\pi f k \Delta t) \right] \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中, $\Delta t = T/N$ 为单层时间厚度, T 为地层总时间厚度, N 为互层组的互层数,式(2-1)的振幅谱为:

$$\begin{aligned} F_A(2\pi f) &= r \left\{ \left[1 - \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot \cos(2\pi f k \Delta t) \right]^2 \right. \\ &\quad \left. + \left[i \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cdot \sin(2\pi f k \Delta t) \right]^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (2-2)$$

将式(2-2)对 f 求导并令其为零,经适当的推导(张玉芬、熊维纲,1994)即可求出:

$$f_{\max} = (2k+1)2\Delta t \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots) \quad (2-3)$$

若只取第一个周期内的值,则有:

$$f_{\max,1} = 1/(2\Delta t) = N/(2T) \quad (2-4)$$

$$\Delta f_{\max} = f_{\max,k+1} - f_{\max,k} = 1/\Delta t = N/T \quad (2-5)$$

式(2-4)、式(2-5)给出了两种介质为等厚薄互层时反射系数序列谱的第一个极值频率 $f_{\max,1}$ 及相邻极值频率间隔 $\Delta f_{\max}$ 与该互层组内单层厚度 Δt 的关系,在已知两种介质等厚薄互层反射系数序列振幅谱的 $f_{\max,1}$ 和 $\Delta f_{\max}$ 时,利用式(2-4)、式(2-5)可求出薄互层组内的单层时间厚度 Δt 。图 2-1 和图 2-2 中 B 分别为类似图 1-4 中 A、B 所示模型的反射系数序列振幅谱

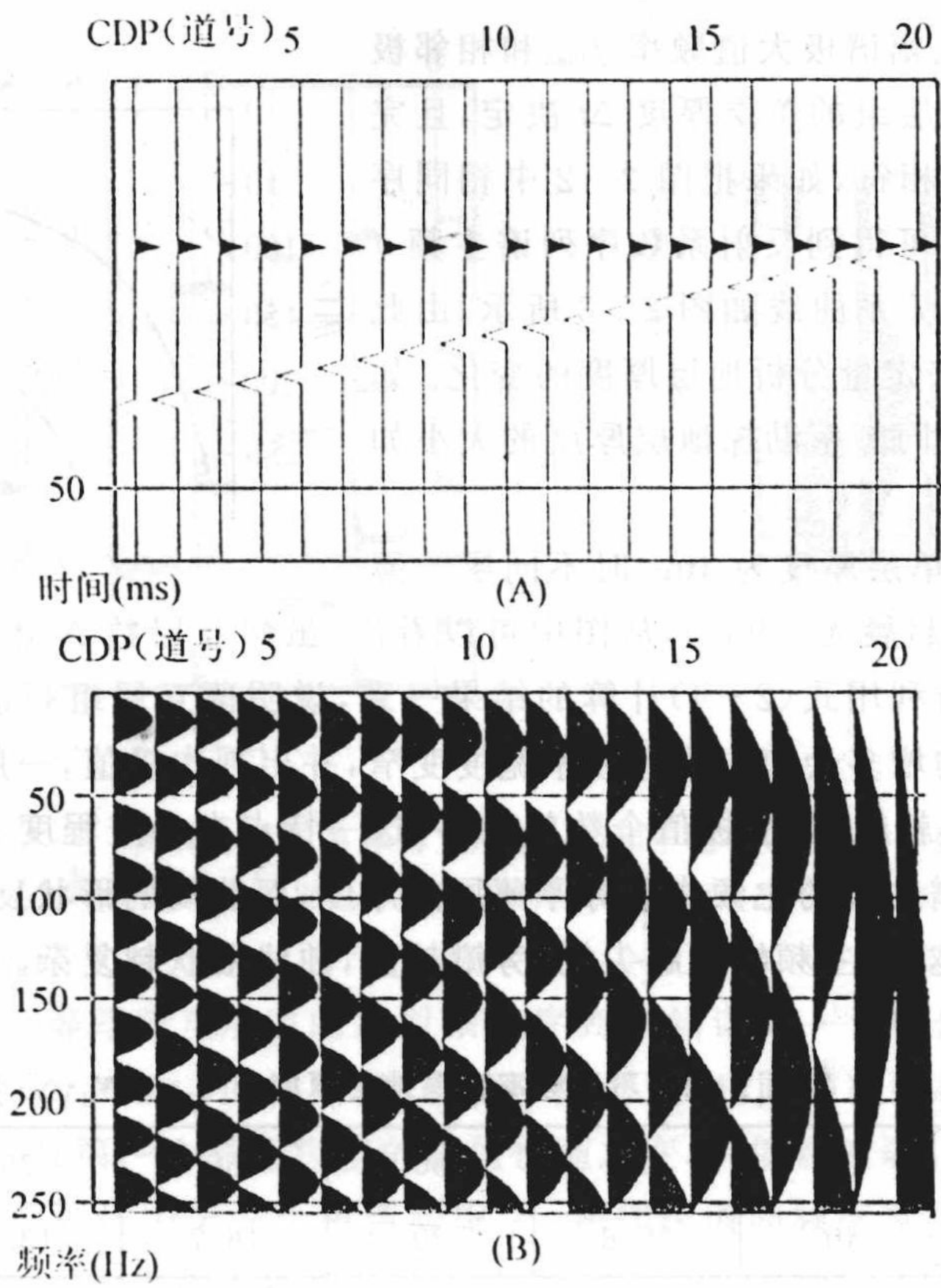


图 2-1 楔状模型
A: 反射系数序列 B: A 的振幅谱

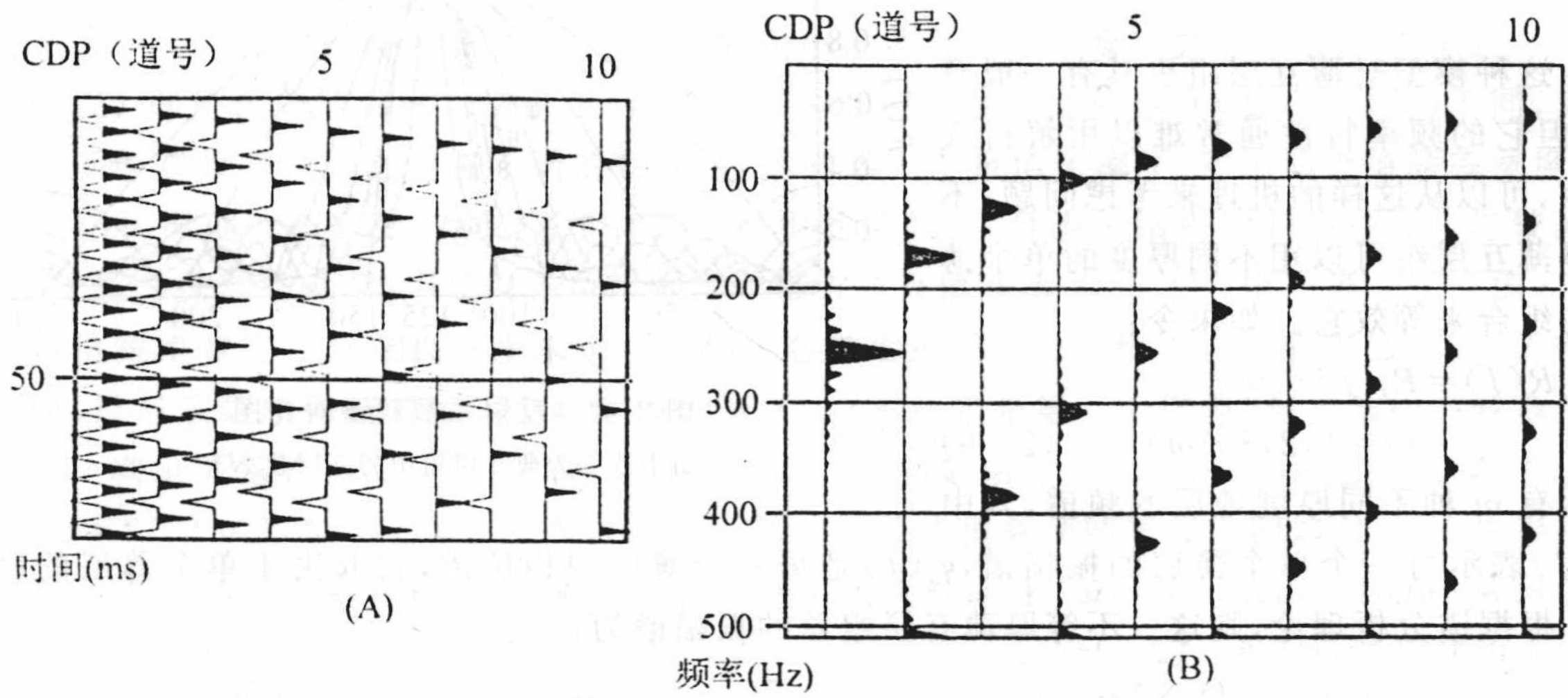


图 2-2 两种介质等厚模型(单层时间厚度从 1~10 道依次为 $\Delta t = 2, 3, 4 \cdots 11\text{ms}$)
A: 反射系数序列 B: A 的振幅谱

图,分析图 2-1 和图 2-2 可见:

(1) 两种介质等厚薄互层组的反射系数序列振幅谱为一个近等幅多极值的周期谱,随组内单层厚度的增大,谱极值个数增多,周期变短,相同序次的极值向低频方向移动,极值间频率间隔变窄。

(2) 反射系数序列振幅谱极大值频率 $f_{\max}$ 和相邻极大值频率间隔 $\Delta f_{\max}$ 均由互层组的单层厚度 Δt 决定, 且完全与式(2-4)、式(2-5)相符, 如果把图 2-2 中相同序次的极大值频率连起来, 就可得到反射系数序列谱主频 f 随各单层厚度 Δt 变化的关系曲线如图 2-3 所示, 由此可根据反射系数序列谱来定量分析地层厚度的变化。如果 $v=4\,000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 则不同频率勘探地层厚度的大小如表 2-1 所列。

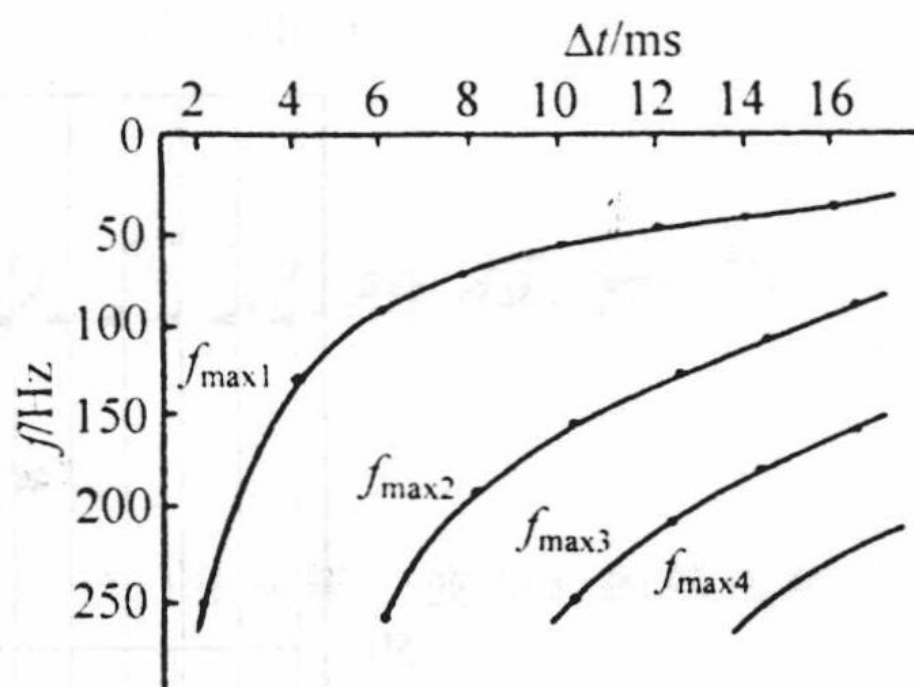


图 2-3 f 与 Δt 关系曲线

(3) 图 2-4 是组内单层厚度为 4ms 时不同层数薄互层的反射系数序列谱(赵晨光, 1986), 从图中可以看出, 虽然互层数 N 不同, 但其主频极大值均位于 125Hz 处, 这与利用式(2-4)计算的结果一致, 说明薄互层组频谱的主极大值频率与互层数 N 无关, 但层数的增多会使主极大值频率宽度变窄, 并出现次极大值, 一般规律是薄互层数 N 越多, 主极大值频率宽度就越窄, 次极大值个数就越多, 这一特点在一定程度上控制着反射波的特征。同时它也说明频谱曲线的主频指示等厚薄层的厚度, 而曲线的形状反映层的多少, 层数越少, 曲线越单纯, 层数越多, 主频峰值越尖锐, 旁瓣越多, 曲线形状越复杂。

表 2-1 不同频率勘探地层厚度

$F(\text{Hz})$	20	25	35	50	60	75	100
$\Delta h(\text{m})$	50	40	28.6	20	16.7	13.3	10

二、不等厚薄互层组

这种模型对薄互层组更具有一般意义, 但它的频率特性通常难以用解析式表示, 可以从这样的机理来考虑问题: 不等厚薄互层组可以用不同厚度的单个薄层的组合来等效它。如果令:

$$R(f) = R_j(f) e^{-i\varphi_j(f)} \quad (j=1, 2, 3 \cdots m) \quad (2-6)$$

表示有 m 种不同厚度地层的频谱, 其中

$R_j(f)$ 表示每一个单个薄层的振幅谱, $\varphi_j(f)$ 是每一个薄层的相位谱, 它取决于单个薄层的厚度。根据谱分析理论, 则这一不等厚薄互层组总的振幅谱为:

$$R(f) = \left\{ \left[\sum_{j=1}^m R_j(f) \cdot \cos(\varphi_j(f)) \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^m R_j(f) \cdot \sin(\varphi_j(f)) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2-7)$$

上式说明不同厚度薄互层组的频率特性是由单个薄层的振幅谱构成, 但不是简单的组合, 其中存在不同厚度层相位差的影响(张玉芬、熊维纲, 1994)。

1. 两种介质不等厚薄互层组

子结构是薄互层组中的基本单位, 两种介质不等厚薄互层组中的子结构是厚度为 Δt_1 和 Δt_2 的两个不等厚层组成。图 2-5 为两种介质为不等厚的薄互层的反射系数序列振幅谱, 分析该图可知:

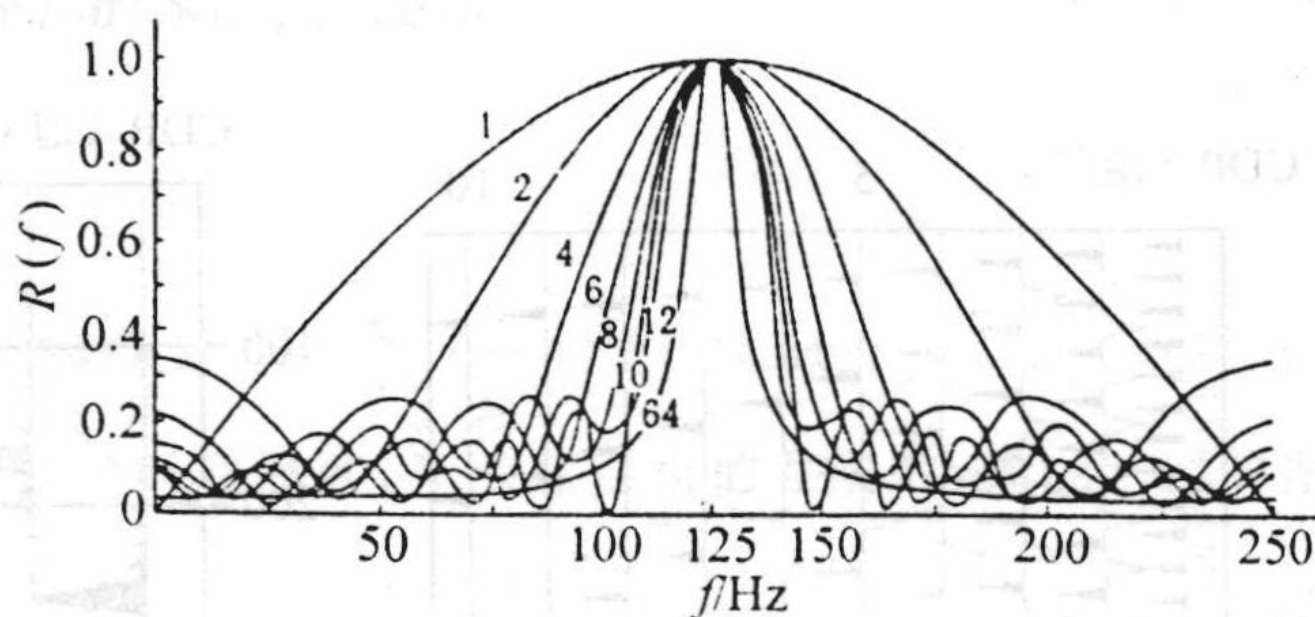


图 2-4 反射系数频谱对比图
(图中数字为薄互层组中的互层数 N)

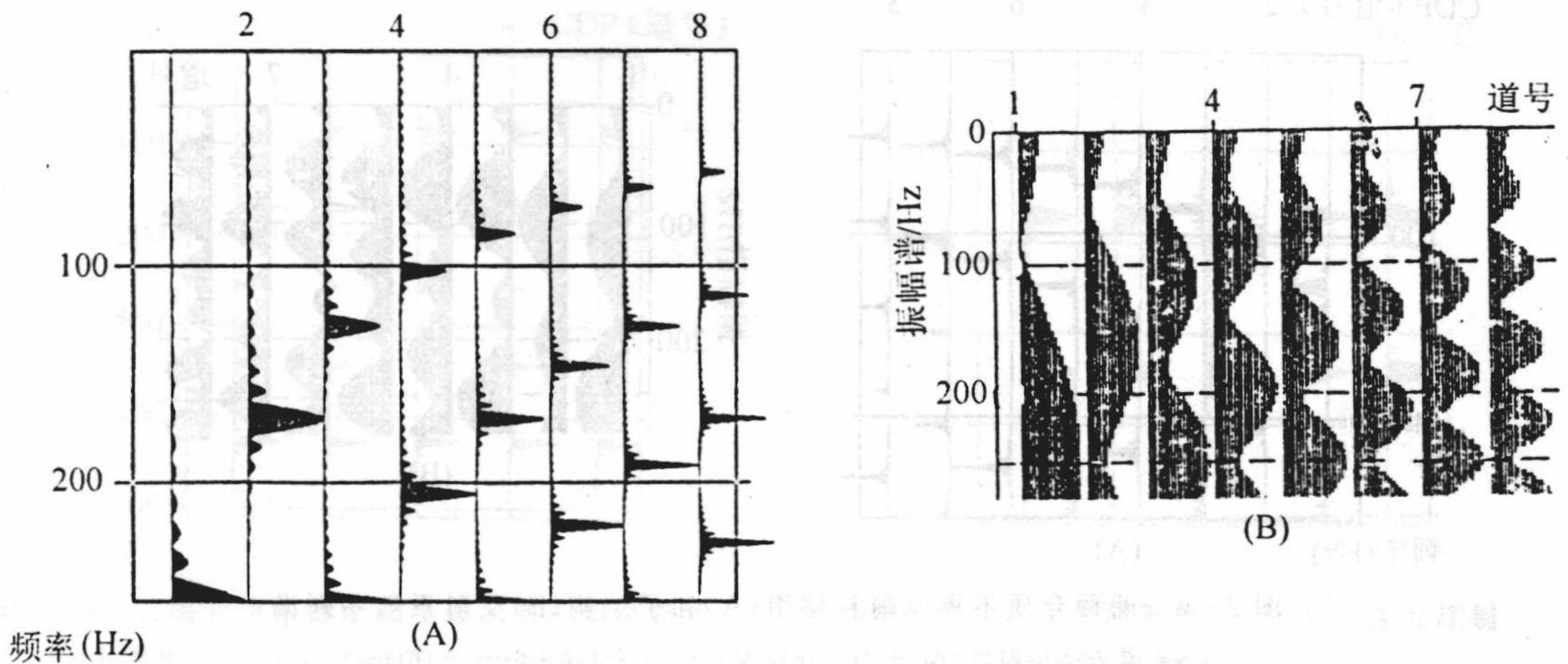


图 2-5 两种介质不等厚薄互层组(A)和子结构(B)反射系数序列谱

1~8 道子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)分别为 2+2, 2+4, 2+6...2+16(ms)

(1) 两种介质不等厚薄互层组的反射系数序列振幅谱为一个幅值不等的多极值周期谱, 随组内子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)的增大, 谱极值个数增多, 相同序次的极值向低频方向移动, 极值间频率间隔变窄, 且第一个频率极值的幅值也随之变小, 能量变弱。

(2) 反射系数序列谱中第一个极值频率 f_1 、相邻极值间频率宽度 Δf 与不等厚薄互层组中的子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)满足关系式:

$$f_1 = 1/(\Delta t_1 + \Delta t_2)$$

$$\Delta f = f_{i+1} - f_i = 1/(\Delta t_1 + \Delta t_2) \quad (2-8)$$

由于 $f_1 = \Delta f$, 所以实际应用中可根据 Δf 的大小来求得不等厚薄互层中子结构的厚度。

(3) 即使在相同采样率情况下, 随不等厚薄互层组中子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)的不同, 其相应的反射系数序列谱也将有不同的特征, 但谱的第一个极值频率 f_1 和相邻极值频率宽度 Δf 与子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)始终满足式(2-8)中的关系式, 且当子结构中较厚层 Δt_2 与较薄层 Δt_1 比值为整数倍时, 利用反射系数序列谱中最大的极值频率 $f_{\max 1}$ (不一定是第一个极值) 及相邻极值频率宽度 Δf , 可进一步求得子结构中各单层的厚度 Δt_1 和 Δt_2 , 一般当 $\Delta t_1/\Delta t_2$ 为奇数倍时, 反射系数序列谱的第一个频率最大值 $f_{\max 1}$ (不一定是第一个极值) 与子结构中较薄层厚度 Δt_1 满足关系式: $f_{\max 1} = 1/(2\Delta t_1)$; 当 $(\Delta t_2/\Delta t_1)$ 为偶数倍时, $f_{\max 1}$ 与 Δt_1 满足关系式: $f_{\max 1} + \Delta f/2 = 1/(2\Delta t_1)$, $\Delta f = 1/(\Delta t_1 + \Delta t_2)$, 其中 Δf 为相邻极值频率间宽度。例如图 2-6 中第 4 道和第 5 道子结构的各层厚度分别为: $\Delta t_1 = 2\text{ms}$, $\Delta t_2 = 8\text{ms}$, 和 $\Delta t_1 = 2\text{ms}$, $\Delta t_2 = 10\text{ms}$, 从图中可得出第 4 道的 $f_{\max 1} = 200\text{Hz}$, $\Delta f = 100\text{Hz}$, 第 5 道的 $f_{\max 1} = 250\text{Hz}$, $\Delta f = 83\text{Hz}$, 这与利用上述关系式计算的结果一致。

(4) 两种介质不等厚子结构反射系数序列谱(图 2-5B)与由此子结构为薄互层的反射系数序列谱(图 2-5A)有很多相似之处, 都是幅值不等的多极值周期谱, 极值频率位置也相同, 但不等厚薄互层组的谱极值频率宽度比单个子结构谱的极值频率宽度要窄, 同样可做出不等厚薄互层组中子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)与反射系数序列谱极值频率变化关系曲线, 从而可更细致地研究其极值频率随子结构厚度变化的规律和估算子结构厚度。

(5) 反射系数序列谱的特征主要与子结构的总厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)及各单层厚度 Δt_1 和 Δt_2 的

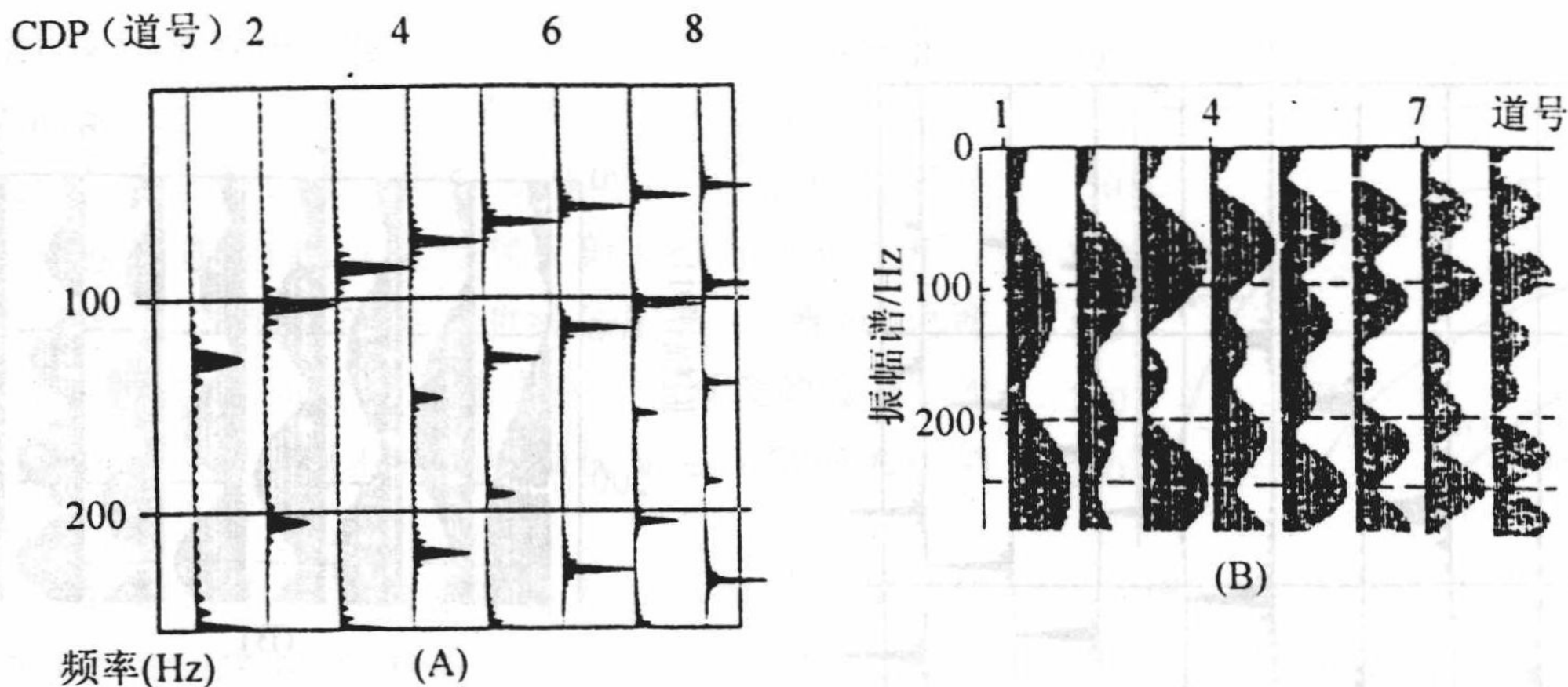


图 2-6 两种介质不等厚薄互层组(A)和子结构(B)反射系数序列谱
1~8 道子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2$)分别为 6+2, 6+4, 6+6...6+16(ms)

大小有关,而与各单层 Δt_1 和 Δt_2 在子结构中的位置无关,即不论子结构厚度组成是($\Delta t_1 + \Delta t_2$)还是($\Delta t_2 + \Delta t_1$)都不会影响谱的特征,如图 2-5 中的第 3 道子结构厚度 $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 2\text{ms} + 6\text{ms}$ 与图 2-6 中第 1 道子结构厚度 $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 6\text{ms} + 2\text{ms}$ 的谱特征完全一样。

2. 多种介质不等厚薄互层组

图 2-7 到图 2-13 分别是由 3 层、4 层不同厚度组成的薄互层的反射系数序列振幅谱,分析这些图可知:当子结构是由多层不同厚度的地层组成时,其反射系数序列振幅谱的第 1 个极值频率 f_1 与子结构厚度有如下关系:

$$f_1 \approx 1/(\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots) = 1/T \quad (2-9)$$

式中, $T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots$ 为不等厚互层组的子结构厚度。据此关系式可估算出不等厚薄互层组的子结构厚度。当子结构内各单层厚度趋于等厚时,则有关系式:

$$f_1 \approx 1/(n \cdot \Delta t) \quad (2-10)$$

式中, n 为子结构内层数, $\Delta t = T/n$ 为子结构单层平均厚度,据此关系可估算出子结构的单层平均厚度,如图 2-10、图 2-11、图 2-12 所示。随子结构内部层数的增加,相应的反射系数序列谱的特征变得更为复杂,谱极值增多,周期变窄,给地层反演带来困难。一般当子结构内层数 $n \leq 5$ 时,利用式(2-11)、式(2-12)求得的地层误差都不是太大。

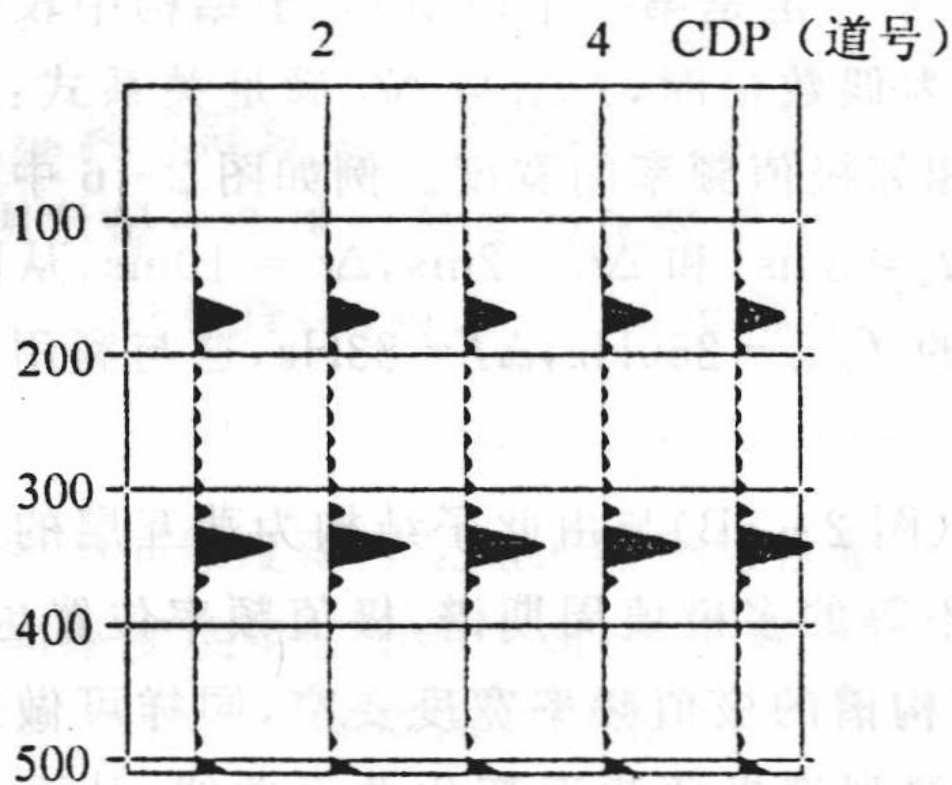


图 2-7 三层介质不等厚薄互层反射系数序列谱
(子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$)分别为 1+2+3(ms))

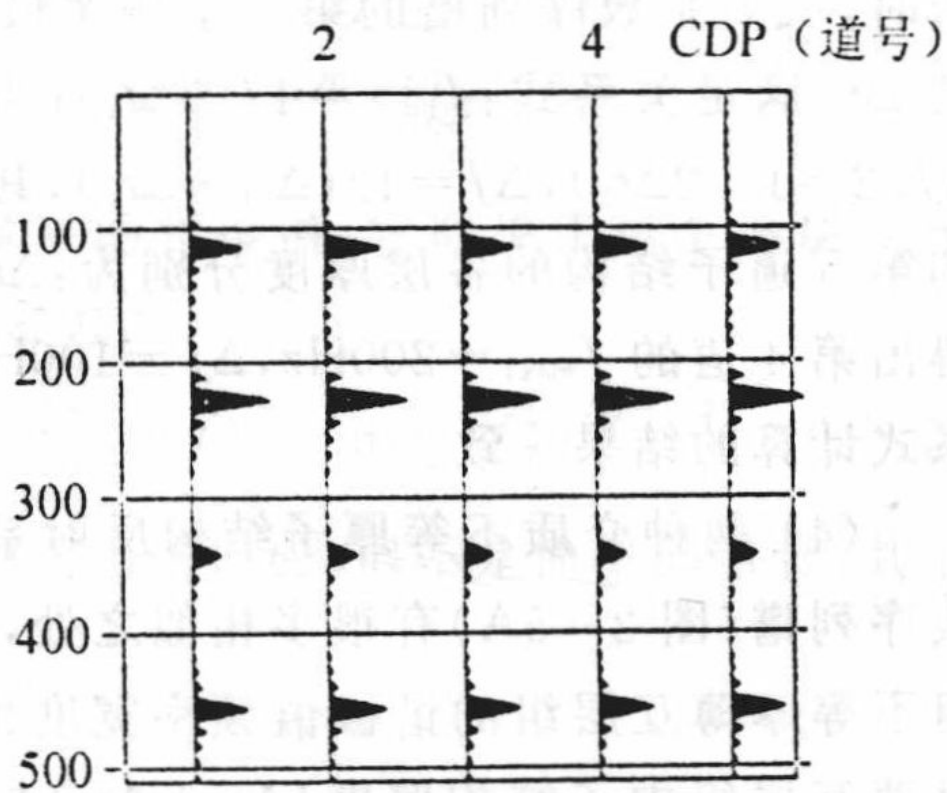


图 2-8 三层介质不等厚薄互层反射系数序列谱
(子结构厚度($\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$)分别为 2+3+4(ms))