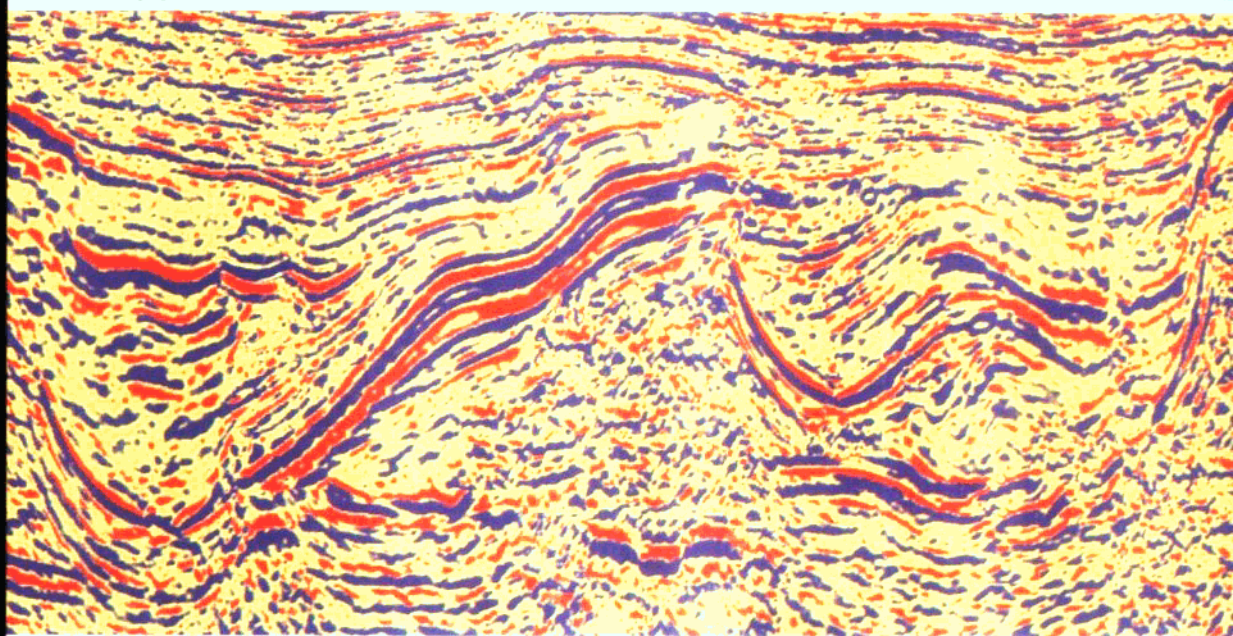


复杂油气藏地震波场特征 方法理论及应用

贺振华 黄德济等著



四川科学技术出版社

1991

1991

1991

1991

1991

1991

复杂油气藏地震波场特征 方法理论及应用

(国家自然科学基金和油气藏地质及开发
工程国家重点实验室基金等资助的研究项目)

贺振华 黄德济

胡光岷 何建军 赵宪生著

四川科学技术出版社

内容简介

本书是一部油气地震勘探方法理论和实际应用方面的专门著作。

全书共分 11 章,主要论述了地震波场特征与复杂油气藏的物理状态和几何分布之间的相互关系和实用的正、反演方法理论。涉及的基本内容有如下几部分:第一介绍了提高地震波场纵向和横向分辨率以及勘探效果的新理论、新技术;第二介绍了各种波场特征参数的提取、利用及其与地质规律的相互转化;第三介绍了岩石物性研究的新成果及其在层位标定、综合解释中的应用;第四介绍了应用地震波场特性反演复杂油气藏的非线性、非确定性方法和油气储层、圈闭的综合评价。除了注意分辨率的提高之外,全书对地震记录信噪比和勘探精度的提高亦十分重视。

本书可供从事油气勘探、开发,地球探测等方面的生产、科研人员参考,亦可供上述专业方向的研究生和高年级大学生参阅。

复杂油气藏地震波场特征 方法理论及应用

编 著 者 贺振华 黄源济等
责任编辑 安小望 尧汝英 赵 钢
封面设计 贺锡雷
版面设计 阴戈民
责任校对 王 勤
责任出版 周红君
出版发行 四川科学技术出版社
成都盐道街 3 号 邮编 610012
开 本 787×1092 毫米 1/16
印 张 16.25 字数 380 千
印 刷 西南冶金地质印刷厂
版 次 1999 年 3 月成都第一版
印 次 1999 年 3 月第一次印刷
印 数 1-1000 册
定 价 58 元
ISBN7-5364-4186-x/p. 101

■本书如有缺损、破页、装订错误,请寄回印刷厂调换。

■如需购本书,请与本社邮购组联系。

地址/成都盐道街 3 号
邮编/610012

■ 版权所有·翻印必究 ■

前 言

复杂油气藏地震波场特征方法理论及其应用是一项既具基础性又有实用性的研究任务,其内涵丰富,研究难度较大。本书所反映的内容是项目组在多年的研究过程中所取得的若干进展。按论题本身应有的广度和深度来衡量,这些进展仅仅是向最终目标跨出了一步而已。但为了促进此项研究的深入发展,我们觉得仍有必要将这些点滴成果尽快地奉献给同行学者和专家,并期望得到大家的批评、指正。

本书第1章、第2章、第3章、第9章和结论部分由贺振华教授撰写,第5章、第6章、第7章以及有关章节的应用实例部分由黄德济教授撰写,第8章、第11章由胡光岷副教授撰写,第10章和若干实例由何建军讲师撰写,第4章由赵宪生副教授撰写。全书由贺振华、黄德济统稿。复杂图件的扫描与加工由贺锡雷完成。

本书所涉及的研究先后得到国家自然科学基金(编号49894190,49774240,49574232),油气藏地质及开发工程国家重点实验室研究基金(编号PLC9601)的资助,并得到了大庆、新疆、胜利、四川、江苏、滇黔桂、南阳、长庆等油田的支持。参加此项研究的项目组成员和研究生李亚林、王成祥、熊高君、陈志文、邵治龙、赵波、杜少青、罗毅、谢贤鹏、安慧、肖梅、周亚同等在他们工作和攻读学位期间,都曾在某些研究方面做出了十分有意义的工作,在此一并表示衷心的感谢。

著 者

1999年3月

目 录

1 绪论	(1)
2 小波分频域复杂地震波场特征分析及薄层反演	(5)
2.1 地震记录的小波分解与重建	(5)
2.2 小波分频域复杂地震波场特征及应用	(7)
2.3 薄层厚度反演	(13)
2.4 地震记录的薄层速度与密度反演	(23)
3 傅氏域复杂地震波场快速正演及精确成像	(29)
3.1 定位原理与非零炮检距地震正演	(29)
3.2 声学及弹性波动方程快速 F-K 正演	(34)
3.3 τ -P 域地震波场 2D 和 3D 叠前偏移成像及其快速算法	(42)
3.4 傅氏域大倾角波动方程深度偏移	(53)
4 地震波场的吸收特征与补偿方法	(59)
4.1 地震波场的吸收模拟与补偿方法原理	(59)
4.2 波场数值模拟分析	(62)
4.3 吸收特征参数 Q 值的提取方法	(63)
4.4 地震波场的补偿应用效果分析	(66)
5 建立高精度速度场的实用新技术研究及应用	(68)
5.1 建立高精度速度场的意义及基本思路	(68)
5.2 地震速度场可信度的影响因素分析	(69)
5.3 提高叠加速度计算精度的方法	(80)
5.4 提高层速度计算精度的广义 Dix 算法	(86)
5.5 由速度谱资料建立工区的平均速度场的实用技术	(88)
5.6 利用钻井资料和地震反射时间建立工区的钻井平均速度场 $\bar{V}_j$	(91)
5.7 井-地相关平均速度场的系列算法	(95)
6 地震反射层位标定的新方法	(105)
6.1 VSP 相移程变反 Q 滤波法的创立及数值模拟分析	(105)
6.2 单井反射层位的 Q 匹配桥式标定法	(111)
6.3 单井标定、多井检验、迭代修正标定的实用技术及应用	(112)
6.4 无井仿真层位标定实用技术	(114)
7 时频-时空域地震波场主特征参数分析法	(123)
7.1 地震波场主特征参数(SMC)剖面的计算原理	(124)
7.2 主特征参数提取精度及影响因素分析	(126)
7.3 时频-时空域积分谱主参数剖面 SISMIC 的计算原理	(133)
7.4 SMC 和 SISMIC 剖面在地质解释中的重要作用及效果分析	(136)
7.5 SMC 和 SISMIC 与瞬时参数和傅氏参数的特征及应用效果比较	(152)

8 复杂波场的地震道非线性约束反演	(156)
8.1 线性方法与非线性方法及其实用技术	(156)
8.2 测井约束非线性反演及其实用技术	(161)
8.3 非线性约束反演理论模拟及应用效果分析	(166)
8.4 多参数约束反演及其应用	(171)
9 多波资料综合解释方法与岩石各向异性基础研究新进展	(175)
9.1 多波层位识别的原则与方法	(175)
9.2 利用井中多波速度求岩层密度、孔隙度的改进方法	(178)
9.3 用沿层分频处理进行多波层位对比	(182)
9.4 各向异性介质参数反演与多波 AVO 分析	(182)
9.5 岩石各向异性的实验研究与无井地震层位标定	(187)
10 地震波场特征参数与地质规律转换的实用技术	(203)
10.1 地震波场特征参数与沉积相转换方法及应用	(203)
10.2 地震主参数与岩性非均质划分及岩性预测	(213)
10.3 地震特征参数在储层含油气性预测中的应用	(222)
10.4 地震主特征参数与地质规律空间展布的大比例尺工业制图	(226)
11 储层含油气综合评价与预测	(230)
11.1 无教师监督的储层综合评价方法	(229)
11.2 有教师监督的油气综合预测方法	(232)
11.3 特征参数选择与预处理	(236)
11.4 油气综合预测实例	(239)
结论	(245)
参考文献	(246)

1 绪论

今后几十年油气资源将仍然是难以替代的主要能源之一,随着过去几十年卓有成效的油气勘探及大规模开发的进行,较易发现的、类型相对简单的油气藏几近殆尽,实现油气增加储量提高产量的主要希望落在寻找新的复杂油气藏和提高老油田油气采收率这两个主要方向上。理论和实践证明:对信息十分丰富的地震波场特征的有效开发及综合利用可在上述两个方向上同时发挥重要的技术支撑作用。

我们知道地震波场特征是地震波传播的运动学特征(走时、速度等)和动力学特征(波的振幅、相位、频率、形态、极性等的总和,能直接或间接地反映地下介质的几何形态、物质成分和结构,是推断、描述地质构造、岩性、岩石结构、矿物成分、流体赋存、地层、岩相、古地理环境与变迁的基础信息。

复杂油气藏在地质形态上的主要特征是陡(倾角大)、断(断层发育)、缓、平(构造幅度小)、薄(储层厚度小)、小(分布范围小,分散)、裂(裂隙孔洞)、深(埋藏深),且往往以这些特征的组合形式出现。对缓、平、薄、小之类的储层而言,在地震记录上因时差小难以察觉和识别,甚至出现假象。对陡、断、裂、深储层而言,地震记录复杂,多种波叠复交叉,信噪比低,层位对比与识别十分困难。

克服上述困难的科学技术关键在于提高地球物理方法的纵、横向分辨率,信噪比以及信息特征的合理利用和数据域的转换。通常就处理、解释方法而言,提高地震纵向分辨率的方法以压缩子波、拓宽频带为基础的各类反褶积方法为主,但直至目前为止,垂向分辨率的提高受到 Rayleigh 或 Widess 极限的限制,而提高横向分辨率的方法,主要靠各类波场成像技术,其成效既取决于成像方法本身的合理性与先进程度,又受预先给定的速度模型逼近实际情况的程度和经济因素的制约。经常难以满足复杂油气藏勘探的特殊需求。

显然,为了实现“增储上产”的目标,仅仅依靠现有的方法技术是不够的,要在继承的基础上力争有新的突破,努力寻求能进一步提高地震波法分辨率、信噪比和可信度的方法理论,并在复杂油气藏勘探和采收率提高等问题上提供新的方法理论和应用效果。经过我们多年的实践,证明下述研究思路、技术路线和研究内容有助于克服以上的困难。

(1) 基本研究思路

利用综合的(地质、地面地震、测井、VSP、钻井、岩石物理)、非线性的、非确定性的分析方法使地震波场特征和复杂地质因素之间的隐式对应关系显式化,提高用地震方法勘探复杂油气藏的可靠性和成功率。

(2) 技术路线

我们采用的具体技术路线可归结为实现如下的 4 个方面的转换:

① 时空域到非时空域的转换。第一指地震波场特征由时间空间域到小波分频域的转换,地震波场特征通常在时空域中显示,其分辨率或 Widess 分辨率极限也是在时空域定义的,通过小波变换可将地震记录精确地分解成为一系列不同频带的分频剖面,我们称其为小波分频域剖面。在小波分频域,能充分展示小波变换“数学显微镜”的优势,地震波场特征与薄层、尖灭体等隐蔽圈闭的关系变得明显、直接。纵、横向分辨率提高,可突破时

空域中四分之一主波长($\lambda/4$)的分辨率极限,达到 $\lambda/8$ 至 $\lambda/64$ 。在分频域还能比较容易地进行信噪比增强处理和各种特征参数提取,为隐蔽圈闭的形态反演和参数反演提供可靠的多种有用信息。第二指由时空域的地震记录到时频主参数域的转换,我们提出并推广使用的主参数时频分析较常规瞬时参数和傅氏参数分析更能突出地震波场特征与地质异常体之间的关系,有利于隐蔽油气藏和裂缝(孔洞)油气藏的勘查。第三指地震波场成像由时空域到 τ - P 域,频率-波数域和时频混合域的转换,这种域的转换,有增加成像精度和稳定性,提高计算效率与可靠性等多种优点。

② 地面地质露头剖面到合成地震记录的转换。与通常声波测井、VSP或人为给定地质剖面参数通过计算机计算得到合成地震记录的数学正演方法不同,与给定地质模型用仪器测试地震记录的物理正演也不同,我们在野外现场采集足够数量的地质露头岩石样品,通过高温、高压条件下岩样波场特征的测试(纵、横波速度、波的吸收衰减和走时等)和相关处理,模拟实际地层埋藏条件下测得的地震仿真剖面。此仿真剖面的获得对利用地震波场特征反演相邻、相近地区地下地质体结构具有直接参照、对比作用。由于在实验室(如“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室的MTS仪器系统)容易测得孔隙度、渗透率、流体含量、流体性质在温度、压力变化时,纵、横波特征的变化,这些规律对多波解释、层位标定、各向异性检测、油藏监测都是十分重要的,是储层特性和各向异性解释的物理、地质基础。

③ 波场特征到地质规律的转换。利用地质结构在地震记录和地震波场特征参数剖面的规律性反映,通过精细速度分析、地质演化分析、主特征参数分析等方法将波场特征还原为地质规律,使地震地质规律的刻画由原来定性的主要依赖于专家个人经验的人工“相面”法过渡到人机交互定量研究和大批例尺批量生产的用计算机操作的工业地质制图新阶段。为圈定复杂油气藏,进行油气预测、井位建议提供丰富清晰的图件与较为可靠的依据。

④ 确定性的、线性的分析方法到非确定的(统计的)、非线性分析方法的转换。地震波场特征与复杂地质体的关系往往是复杂的、非线性的关系,应用非线性的反演方法(神经网络、遗传算法等)较常规的线性方法更加合理并有更高的反演精度与可信度。

(3) 研究内容与进展

复杂油气藏勘探和开发是一项系统工程。图1-1概括了应当研究的主要内容。这些内容虽然与我们参加的研究项目有关,也会受到研究经验的局限,但仍有其普适性,如能针对具体研究任务对此框架做一定的调整,相信能收到更好的效果。

以下内容是本书的特色和探索性研究:

① 提出了隐蔽油气圈闭地震波场特征显式化处理方法。隐蔽圈闭是复杂油藏的主要类型之一,是现行常规地质物探方法难以发现的油气圈闭,如地层、岩性、古地理环境变化形成的圈闭,它们在常规地震记录上很难识别与发现。利用时频时空域多维多分辨率和地震波场主特征参数分析等新方法,使得隐蔽圈闭能在地震记录的波场特征中较清晰地显现出来,提高了识别和寻找隐蔽油气圈闭的可靠性。

地震波吸收特性的研究与补偿对提高分辨率和信噪有重要作用。

小波分频域中的数值计算表明,厚度为 $1/8$ 至 $1/64$ 波长(λ)的薄层透镜体和薄尖灭

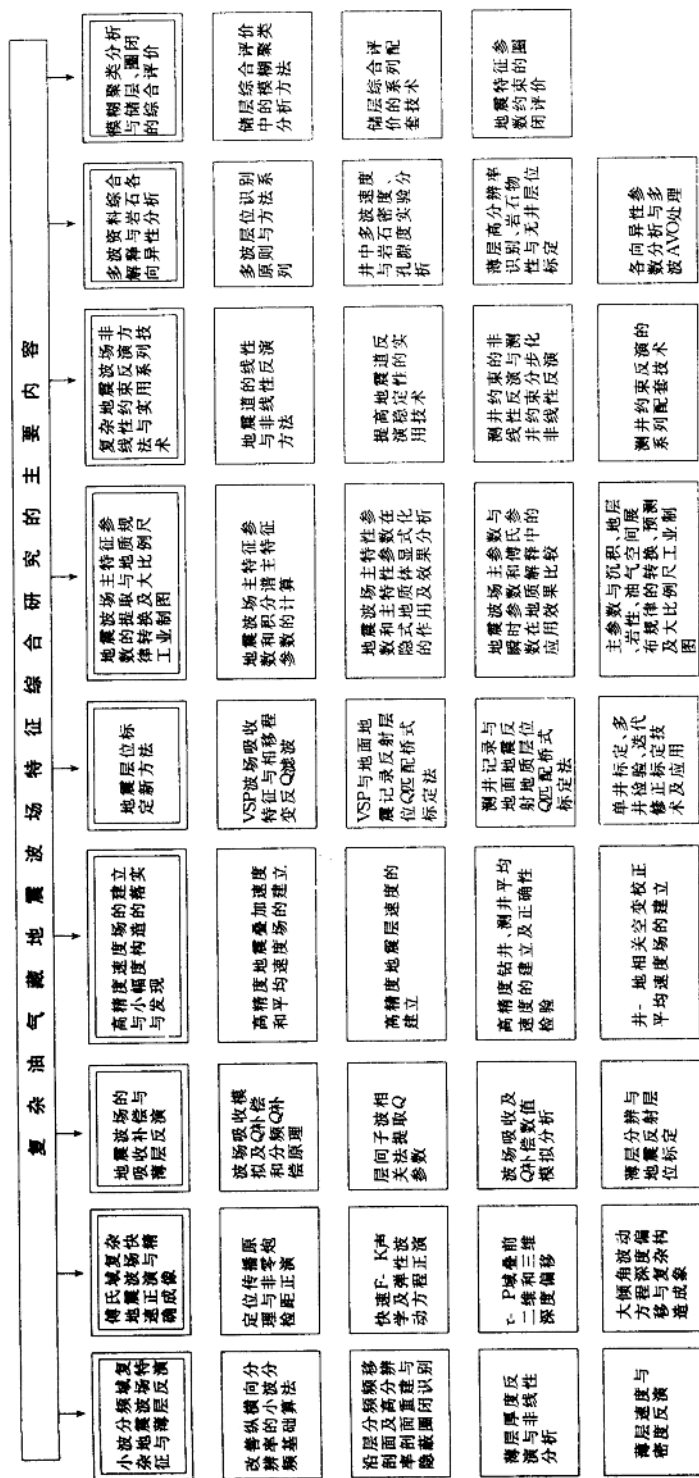


图1-1 复杂油气藏地震波场特征综合研究的主要内容

层可有效识别,突破了在时空域中地震波垂直分辨率为 $\lambda/4$ 的极限。

② 发展了适应陡(倾)断(层)型复杂构造波场正演和成像的新方法,先后提出了稳定性好,能使大倾角地层(70度以上)正确成像,能适应地震波传播速度纵横向变化的复杂构造频率波数域波场成像方法系列, τ -P域地震资料三维叠前深度偏移、混合域叠前正演与偏移。其中通过提出定位原理使得仅利用单程声学方程即可形成非零炮检距地震记录和P-SV转换波记录,起到了通常需要全程声学方程和弹性波动方程所起的作用,简化了计算工作量并有助于消除多次反射波的不利影响,突破了通常认为用单程声学方程只能做偏移,不能做非零炮检距正演的定论。

③ 研制了地震波场特征转化为地质规律的实用方法(如沉积相工业制图、速度精细分析、井一地相关地震地质层位标定等)使物探、地质紧密结合,增加了解释的直观性、可靠性。提高了勘探平缓构造的能力。

④ 提出了多波波型(纵波、横波、转换波)识别和多波地震层位对比的系列原则与方法,利用MTS岩石特性测试系统实验研究了波场特征和岩石各向异性随温度、压力、岩样流体含量、孔隙度、岩性成分、密度等参数的变化特征和基本规律,为油气开发监测、采收率提高提供了理论依据和技术支撑。

⑤ 通过模拟实际地下深处理藏地层所处的温度、压力条件,详细研究了地表露头岩石样品的物理参数随地层埋深(或温度、压力)的变化规律,完成了地面地质剖面到地下剖面特性的转换并计算了仿真岩性剖面,仿真测井曲线,仿真波阻抗曲线,为无井、少井地区地震层位的标定提供了可供参考的新方法,开辟了岩石物理特征应用研究的新途径。

⑥ 完善并发展了一套非线性的、非确定性的特征参数(厚度、速度、密度、孔隙度、各向异性等)反演和储层综合评判新方法,主要有神经网络,模式识别,遗传算法,模拟退火,模糊聚类,非线性最优化等方法。

⑦ 研究了高精度速度场的新技术方法,提出了井-地相关空变校正平均速度场分析方法和加权迭代复数道人机交互速度分析方法。提高了速度分析的精度与可信度,对幅度低于30m的平、缓圈闭的识别起到控制作用。

⑧ 为了强调所述方法理论应用的途径与效果,在有关章节加入了一些应用实例,以期引起实际工作者的兴趣和重视。

2 小波分频域复杂地震波场特征分析及薄层反演

地层尖灭、河道砂、礁体、缝洞、薄层或薄互层等薄或小的复杂圈闭在地震记录上很难识别和发现,具有较强的隐蔽性,故有时被称为隐蔽圈闭。提高隐蔽圈闭识别能力是一项涉及各个学科领域(地质、物探、信息、仪器等),各个工作阶段(采集、处理、解释等)的系统工程,核心问题还是如何进一步提高地震记录的分辨率和信噪比。许多论著已全面、系统地介绍研究过这些问题,我们在此不准备重复这些研究,将集中讨论在地震处理、解释阶段如何在小波分频域中提高分辨率和信噪比的问题,以期突破常规时间—空间域中的各种分析方法的局限,提高记录的质量和分辨能力。

我们知道对目标体的观察和分辨可以在可见光条件下直接用肉眼也可借助望远镜、放大器和显微镜,还可利用无线电波或红外线等非可见光法探测,以避免受黑夜或云层阻挡的限制,清晰地显示和分辨待观察的目标。如果我们把地震记录从通常的时-空域转换到其他非时-空域中去观察分析,也有可能得到更高的分辨能力和更高的抗噪能力。我们提出的小波分频域就是这样一种较理想的非时-空域。

所谓小波分频是指利用小波变换这一新的数学分析方法的多分辨(多尺度)功能和优良的“数学显微镜”特性,将地震记录分解为一系列具有不同中心频率的窄频带地震剖面。我们称其为小波分频剖面,各分频剖面的集合即小波分频域。在该域中隐蔽圈闭的横向分辨率很高,但纵向分辨率不高,利用我们提出的“沿层分频处理”、“高分辨率剖面重建”和“薄层反演”等新方法,纵、横向分辨率均有很大的提高,可以超过 Rayleigh 和 Widess 定义在时空域中的分辨率极限。

上述研究对薄和小层的定性识别具有十分重要的意义。但是离定量反演还有一定距离。为此我们专门研究了薄和小层反演(厚度、速度、密度,各向异性等)问题,虽然难度很大,但仍然获得了有意义的进展。

2.1 地震记录的小波分解与重建

地震记录的小波分解与重建是地震资料分频处理的基础。我们把单张地震剖面分解为不同频段的分频剖面是以单道地震记录的小波分解为基础的,设地震记录道为 $f(t) \in L^2(R)$, $f(t)$ 的连续小波变换为:

$$W_{\Psi}^f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{C_{\Psi}}} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int \Psi\left(\frac{b-t}{a}\right) f(t) dt \quad (2-1)$$

式中 $a, b \in R, a \neq 0$ 。

$$C_{\Psi} = 2\pi \int \frac{|\tilde{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (2-2)$$

而
$$\tilde{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \Psi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2-3)$$

且
$$\int \left| \frac{\tilde{\psi}^2(\omega)}{\omega} \right| d\omega < \infty \quad (2-4)$$

它综合了 $\Psi(t)$ 具有衰减性与振荡性(波动性)的特点, $\Psi(t)$ 通常称为相容解析小波。

在本章的应用实例中, 采用了调制型的高斯小波作为分解的小波函数, 其形式为

$$\bar{\psi}_s(\omega) = e^{-(\omega-s)^2/2} - e^{-s^2/4} e^{-(\omega-s)^2/4} \quad (2-5)$$

$$\Psi_s(t) = e^{ist} e^{-t^2/2} - \sqrt{2} e^{-s^2/4} e^{ist} e^{-t^2} \quad (2-6)$$

当 $S > 6$ 时, (2-6) 式右边第二项可以忽略, 仅取

$$\Psi(t) = e^{ist} e^{-t^2/2} \quad (2-7)$$

由 $W_\psi^f(a, b)$ 和小波函数 $\Psi(t)$ 求函数 $f(t)$ 的过程称为 $f(t)$ 的重建或者小波反变换:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \iint |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) W_\psi^f(a, b) \frac{da db}{a^2} \quad (2-8)$$

其中 $f(t)$ 和 $W_\psi^f(a, b)$ 应保证一定程度的能量守恒或者同构性, 即

$$\int |f(t)|^2 dt = \iint |W_\psi^f(a, b)|^2 \frac{da db}{a^2} \quad (2-9)$$

实际计算时, 往往取小波变换的离散形式, 常将 $|a|^{\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 表示为

$$\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \Psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (2-10)$$

$m, n \in \mathbb{Z}$

式中 $a_0 > 1, b_0 > 0$, 于是离散小波变换为

$$D_{m,n}^f = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \int f(t) \Psi_{m,n}(t) dt \quad (2-11)$$

$f(t)$ 的离散重建公式为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{m,n}^f \cdot \Psi_{m,n}(t) + R \quad (2-12)$$

式中 R 为重建时的误差项, 精确重建时, $R \rightarrow 0$ 。能否精确重建的关键在于 a_0, b_0 和 $\Psi(t)$ 的选取, 选择 a_0 接近于 1, b_0 接近于零时能够精确重建, 但这时小波函数互相重叠, 数据的冗余度很大, 徒然增加太多的计算工作量, 当 $a_0 = 2, b_0 = 1$, (2-10) 式变为

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \Psi(2^{-m}t - n) \quad (2-13)$$

小波函数的重要作用在于对它实施平移与缩放之后可生成 $L^2(\mathbb{R})$ 空间的一组正交基

$$\{2^{-m/2} \Psi(2^{-m}t - n), m, n \in \mathbb{Z}\} \quad (2-14)$$

并利用它对信号 $f(t)$ 进行分解。如果 $f(t)$ 为地震道记录, $f(t, x)$ 为地震剖面(二维), 则对一系列地震道 $f(t, x)$ 进行小波分解得到的分频记录 $D_{m,n}^f(t, x)$ 称为地震剖面的分频剖面, 称 $\{m, n, t, x\}$ 为小波分频域:

$$D_{m,n}^f(t, x) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \int f(t - t', x) 2^{-m/2} \Psi(2^{-m}t' - n) dt' \quad (2-15)$$

上式说明地震记录的分频处理可看成是用小波函数对地震剖面进行逐道褶积的结

果。选取不同的 m, n 值可得到一系列的分频剖面。分频剖面的中心频率和带宽主要取决于参数 m 及 $f(t, x)$ 和 $\Psi_{m,n}(t)$ 的频谱特性。因为

$$D_{m,n}^f(\omega, x) = \frac{1}{\sqrt{C_\Psi}} F(\omega, x) \cdot \Psi_{m,n}(\omega) \quad (2-16)$$

式中 $F(\omega, x)$ 和 $\Psi_{m,n}(\omega)$ 分别为 $f(t, x)$ 和 $\Psi_{m,n}(t)$ 的付氏变换。

2.2 小波分频域复杂地震波场特征及应用

我们先以试验方法分析小波分频域中地震波场特征。

图 2-1(a) 显示了一个薄透镜体模型, 透镜体的地震波速度 V_2 为 3800m/s, 透镜体顶界面以上介质的波速 $V_1 = 3300$ m/s, 底界面以下介质的波速 $V_3 = 3600$ m/s。透镜体中部的最大厚度 $H_c = 3.4375$ m, 向两边逐渐减薄, 分别终止在第 12 道和第 40 道, 透镜体的埋深为 495m。用一个主频为 30Hz, 延续度为 72ms 的雷克子波(图 2-1(b))与透镜型模型褶积形成的合成反射波记录示于图 2-1(c), 在合成记录上只能看到一个匀称的水平同相轴, 用肉眼很难在时—空域中觉察薄透镜体的存在。这是因为透镜体的最大厚度 $H_c = 3.4375$ m, 等于所用子波波长 $\lambda = V/f = 3300\text{m/s} \div 30\text{周/s} = 110\text{m}$ 的三十二分之一, 即 $H_c = \frac{\lambda}{32}$ 。

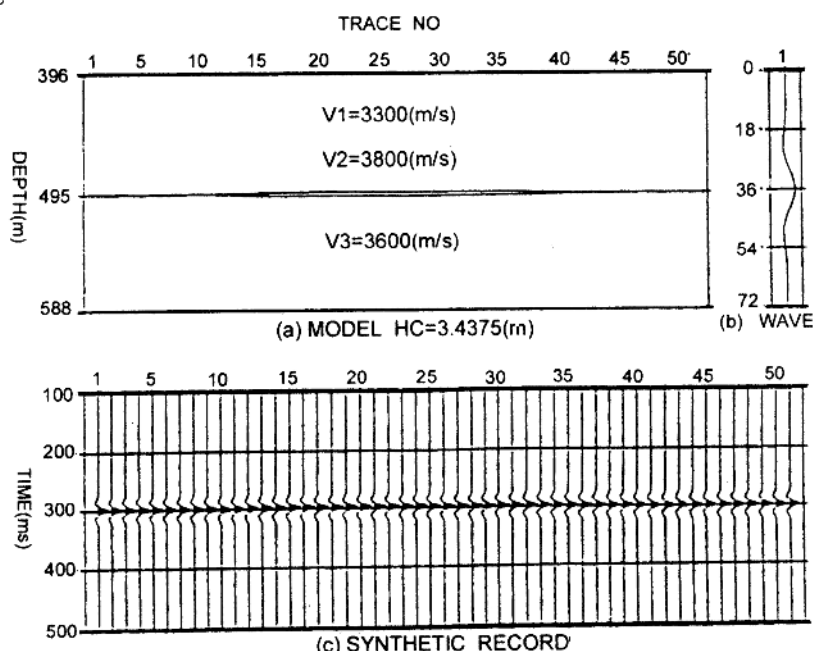


图 2-1 薄透镜体地质模型及其零炮检距地震合成记录
(a) 地质模型; (b) 形成合成记录子波波形; (c) 合成记录

对图 2-1(c)进行小波分解得到一系列的分频剖面 $\{D_{m,n}^f(t,x)\}$,每一分频剖面的横轴 x 为地震道序号,纵轴 t 为反射时间,这与图 2-1(c)完全一致。各分频剖面上均标有 $f_p, f_c, \Delta f$ 三个参数,其中 f_p 为对应于该分频剖面的小波函数振幅谱峰值频率, f_c 为该振幅谱通频带(0.707)的中心频率, Δf 为通带宽度。图 2-2 为小波分解时所用的小波集的波形(a)和对应的振幅谱(b)。小波集是用(2-7)式计算的,此处选用的 $S=20 \gg 6$,因此可以舍去(2-6)式右边的第二项。(2-7)式有实部和虚部两部分,我们仅采用了其实部。实际计算表明舍去虚部并不增加可察觉的误差。

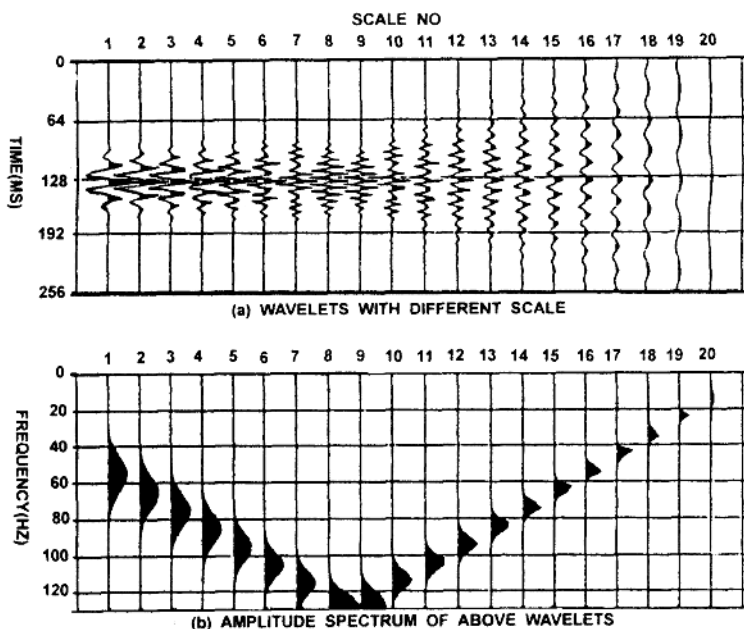
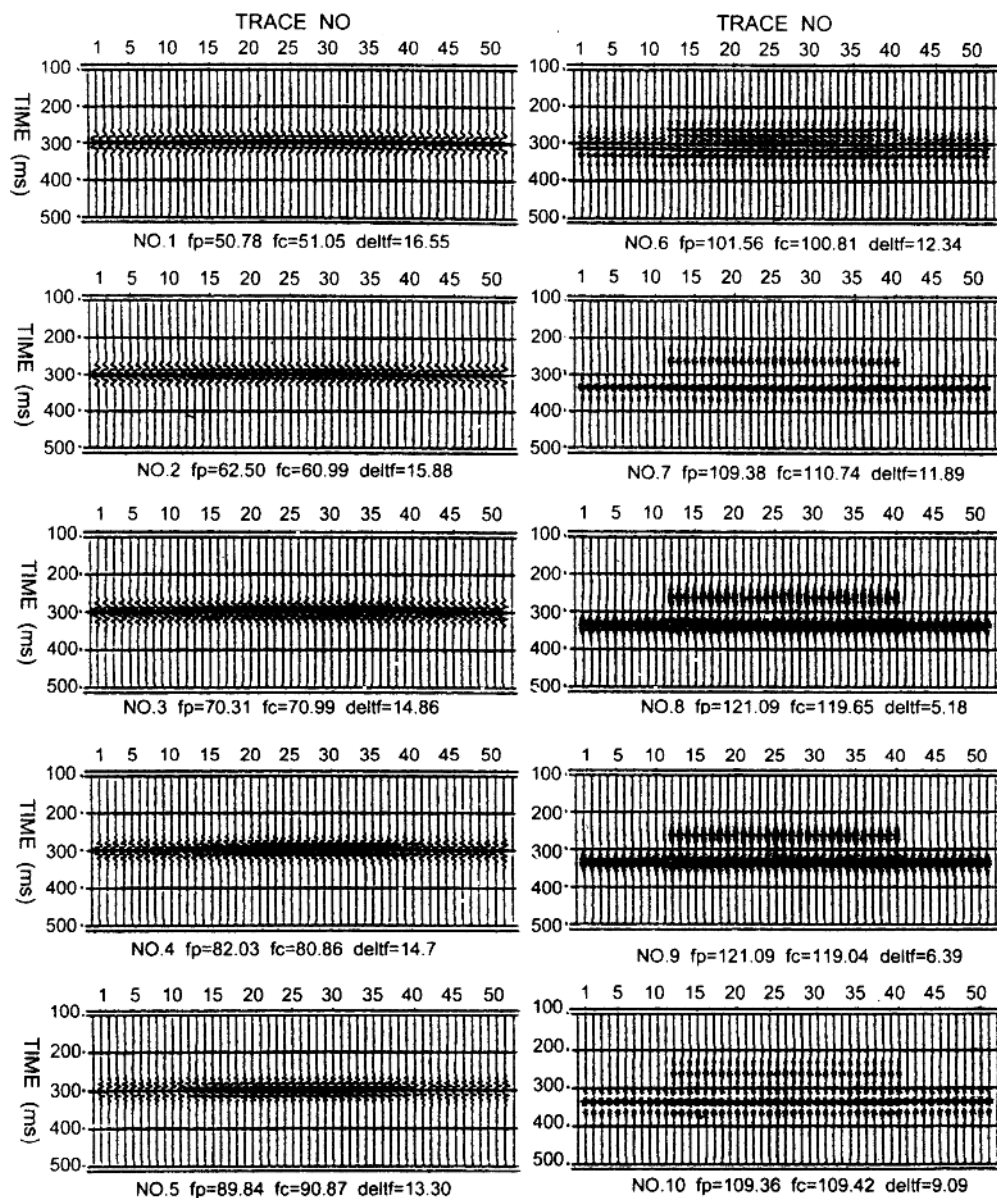


图 2-2 小波函数系列及其振幅谱

(a) 高斯型小波函数; (b) 与其对应的小波函数的振幅谱

图 2-3 显示的是对图 2-1(c)进行小波分解的 20 个分频剖面,其序号分别与图 2-2(a)中小波函数的序号对应。在序号为 5 至 12 的八张分频剖面上,用肉眼可以识别出第 12 道至第 40 道有明显振幅增强和出现双同相轴的异常现象,异常的横向分布与图 2-1(a)薄透镜体的横向分布是一致的。

非常有意义的是,这里薄层的最大厚度为 $\lambda/32$ 并向两边逐渐减至零,而分频剖面上从第 12 道至第 40 道可明显识别这个透镜体,这说明,分频剖面对厚度远小于 $\lambda/32$ 的薄层在横向上仍然能够有效地分辨。我们另有一组实验把子波主频减小一半,其他参数相同,这时薄层最大厚度仅为 $\lambda/64$,还可清楚识别薄层,远远突破了在时一空域中 $\lambda/8$ 分辨率的极限。当然这里所说的分辨率主要指横向上的识别,与 Widess(1973),Knapp(1990)等人定义的分辨率在意义上有一定的差别。而且在纵向上由于频带窄,子波延续度加大,



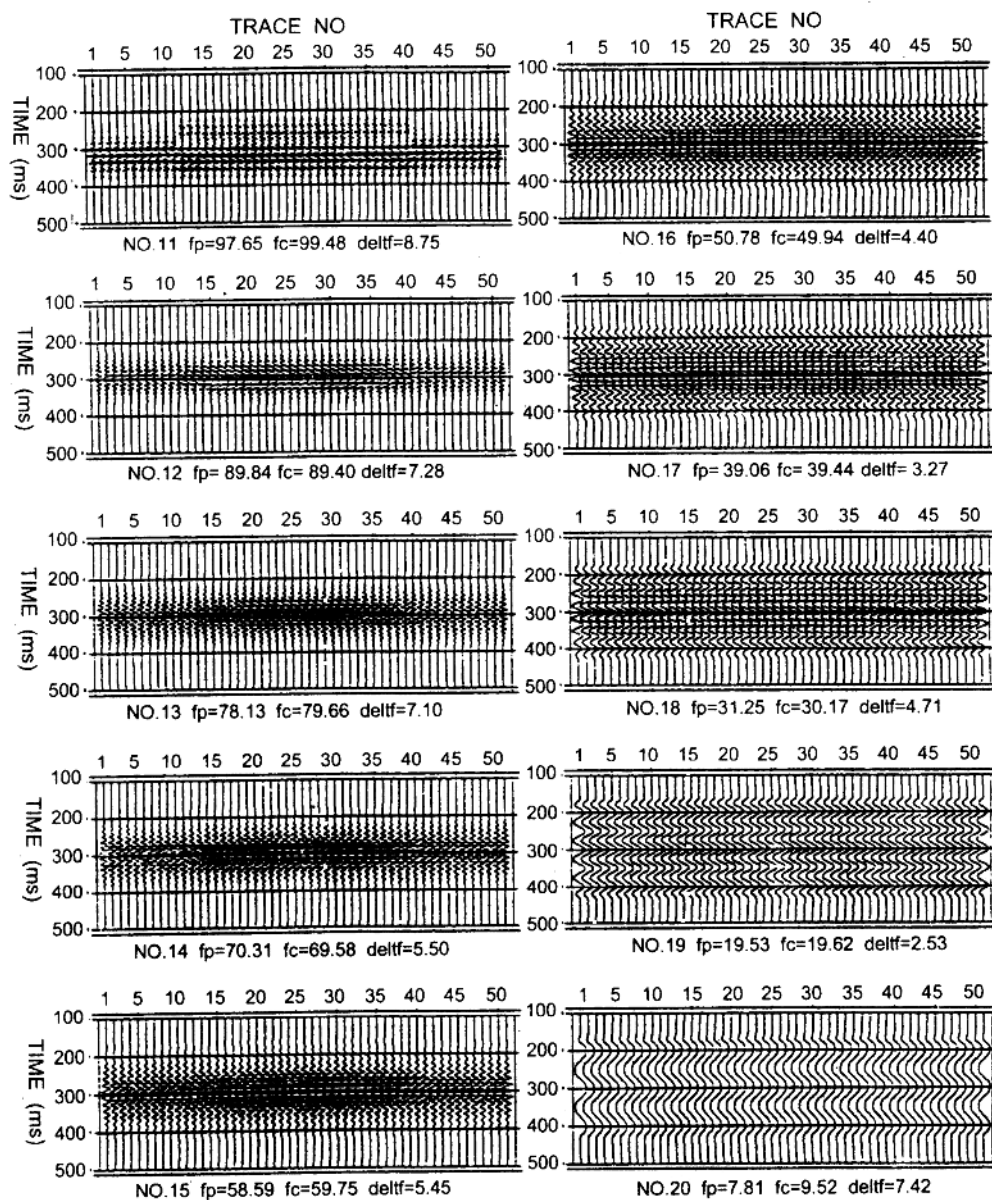


图 2-3 薄透镜体合成记录(图 2-1(c))的分频剖面
(分频剖面的序号 1~20 与图 2-2 所用小波的序号 1~20 是一一对应的)

不但薄层厚度无法求取,相邻厚层之间的同相轴亦会相互干扰,从而影响整个剖面的总体面貌与分辨率。如不克服这种缺陷,上述方法的意义将大大降低。针对这一实际矛盾,我们提出了沿层分频处理和高分辨率剖面重建两个新方法。所谓沿层分频处理沿袭了“沿层频谱”,“沿层速度分析”等方法的基本思路,针对目的层进行分频处理,这样可以最大限度地利用分频剖面横向上的高分辨力特性,同时避免了它与上下邻近同相轴的干扰和重叠。另外沿层分频处理的结果还可按记录能量包络峰值等功率谱参数加以显示,它一方面可以把分频记录道中延续较长的子波压缩成单一的一个数据(如包络峰值),有利于把各个沿层分频处理的结果在纵向上排列起来而彼此不重叠,还能提高地质异常体纵、横向识别的可靠性(图 2-4),为薄层厚度反演提供输入参数。

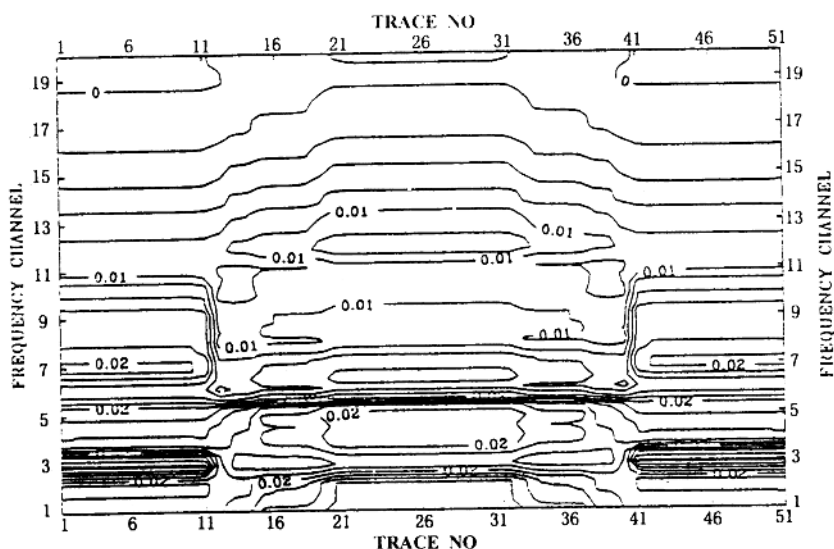


图 2-4 沿层分频处理结果不同显示方法的例子

(a) 为类似于图 2-3 的分频剖面(这里未列出);(b) 分频剖面记录道的功率谱综合剖面

高分辨率剖面重建以小波反变换为基础。首先要做到剖面的精确重建,然后再研究剖面的高分辨率重建。我们的研究表明,只要能够正确选择小波类型与参数,是能够做到精确重建的。图 2-5 是精确重建的例子,图 2-5(a)为一薄透镜体的合成记录,图 2-5(b)是对(a)经过小波分解之后重建的结果。两者高度相似,说明重建是精确的。但精确重建并不是我们的最终目的,我们的目的是获得纵向上有较高分辨率的结果。通过对分频剖面作类似于谱白化的处理,可获得纵向上有较高分辨率的重建剖面。图 2-6 是高分辨率重建的例子。图 2-6(a)是一个与图 2-1(a)类似的薄透镜体(只是最大厚度为 $\lambda/8$)的合成记录,图 2-6(b)是对(a)进行分解之后做高分辨重建的结果,它的分辨率较图 2-6(a)有明显提高。

图 2-7 是一段实际地震剖面进行高分辨率重建的例子,图 2-7(a)为未处理的原始剖面,图 2-7(b)为进行高分辨处理后的某些分频剖面 b_1 至 b_4 ,图 2-7(c)是重建的结果。在