

地震勘探信息技术 提取、分析和预测

DIZHEN KANTAN XINXI JISHU
TIQU FENXI HE YUCE

● 徐伯勋 白旭滨 于常青 编著

地质出版社

地震勘探信息技术

——提取、分析和预测

徐伯勋 白旭滨 于常青 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书共五章。前三章分别介绍了提取地震信息的三种主要途径。第4章强调了地震资料一定要“三高”采集、处理,以确保提取信息的有效性、真实性;介绍了高信噪比和高分辨率及信噪比的各种定义,以及信号与噪声的差异;叙述了提高信噪比的各种途径和方法,以及综合分辨率的不同准则和影响分辨率的主要因素及解决办法,讨论了信噪比和分辨率的关系、矛盾及解决办法。第5章介绍了一些常用和较新的对信息进行分析和预测的方法。书中有些内容是作者多年的研究成果和经验总结。

本书可供从事地震勘探技术人员、研究人员和有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震勘探信息技术:提取、分析和预测/徐伯勋等编著. —北京:地质出版社,2001.12
ISBN 7-116-03496-X

I. 地… II. 徐… III. 地震勘探-信息处理-信息技术 IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 077912 号

责任编辑:陈军中 焦恩富 李 颖

责任校对:王素荣 关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324574(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787×1092¹/₁₆

印 张:11.25

字 数:250 千字

印 数:1000 册

版 次:2001 年 12 月北京第一版·第一次印刷

定 价:26.00 元

ISBN 7-116-03496-X/P·2237

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前言

以地震资料为基础,结合测井资料和实验室资料,以及地质先验知识的地震特征信息的分析、提取是今后油气勘探的主要手段,也是储层横向综合预测和油藏描述的途径。利用上述手段可得到一类较为可信的地下构造、岩性、物性和含油气性的特征信息。本书(第1章§2)汇聚了前人通过实验室资料、测井资料等得到的一些经验公式供参考;地震资料的反演(第2章)和特殊处理方法(第3章)也是获得地震特征信息的一个重要途径;另外地震波形的形态分析(包括波形分析和频谱分析)是目前储层横向预测的常用方法。本书将地震信号分别看成为确定性和随机性的信号来进行较详细的分析;同时在时域和频域上提取各种形态参数,然后用模式识别或神经网络等方法进行分析、预测。当然,这些信息的可靠性与被处理资料的质量、处理手段有关,最后还要通过实践来证实。

我们知道岩石的物理性质是通过许多物理参数来反映的,而这些参数大多数与波动方程有关,所以我们一开始就简要地介绍了波动方程和一些有关的知识(第1章§1)。

随着勘探技术和处理方法的进步,提取这些信息的数量和精度也在不断增加和提高。我们利用这些地震特征信息分析其在空间的分布情况、变化幅度和范围,以及它们之间的关系,并与地层、含油气性联系起来,寻找含油气储层的特征信息,再用测井资料、实验室资料和地质的先验知识对地震资料中得到的地震特征信息进行分析、对比和验证,从已知推到未知,找出规律性的特征来识别和预测未勘探、开发的地区。

地震特征信息很多,这里把它们分成6类,它们都是地层构造、岩性、物性和含油气性等的具体反映。当然任何单一的信息都是无法确定地层性质的,因为是多解的。正如想要识别某人时,只知其身高是无法识别的;如再知其体重、性别就要好些;如再知其脸谱特征等就好识别了。这样就减少了多解性,增加了惟一性。所以我们一般总是用综合分析的办法,只有综合才能提高分析的可信度、减少多解性;只有综合才能提高预测精度和可靠性。当然所用参数越多,计算量就越大。因此,我们要根据研究区的情况,尽可能找出具有代表性的、独立性的和敏感性的特征参数,参与综合分析和预测。

提取上述特征参数与地震资料的质量关系密切。要求高信噪比、高分辨率和高保真度的地震资料的采集和处理是成功的关键和基本保证;否则,提取的许多地震信息或特征参数也就失去了地质价值。高信噪比和高分辨率处理占了常规处理的绝大部分内容。为此本书在第4章中较详细地分析、介绍了它们的各种定义、方法和原理,以及解决的具体途径和其间的联系。

为了便于读者对地震信息进行分析和预测的需要,本书在第5章中简要地介绍了目前常用的有关数学方法,其中有许多方法还举了例子。

本书承中国地质大学(北京)赵静宣教授细致审阅,并提出了许多宝贵的意见和建

议，在此谨表示深切的谢意。

由于作者水平有限，书中难免还存在不少缺点和错误，恳请读者批评、指正。

作 者

2001 年 1 月

目 录

第 1 章 储层参数及它们之间的关系	(1)
§ 1 弹性体简介	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 常用的 5 个弹性系数简介	(2)
1.3 弹性波方程	(3)
1.4 纵波和横波及其速度	(4)
1.4.1 纵波和横波	(4)
1.4.2 纵波和横波的速度	(4)
1.5 地震方法研究的主要对象	(5)
§ 2 储层	(6)
2.1 储层的概念及其性质	(6)
2.2 储层参数及其性质和相互关系	(7)
2.2.1 引言	(7)
2.2.2 地震反射波的振幅	(8)
2.2.3 地震波的传播速度	(9)
2.2.4 速度与孔隙度、泥质含量的关系	(10)
2.2.5 速度与深度、岩石年龄、压力的关系	(12)
2.2.6 品质因子 Q 值与吸收系数和速度的关系	(13)
2.2.7 速度和泊松比的关系	(15)
2.2.8 速度、密度与波阻抗、孔隙度和弹性系数的关系	(16)
2.2.9 密度与孔隙度、泥质含量、饱和度、深度和速度的关系	(18)
2.2.10 渗透率与孔隙度、密度的关系	(19)
2.2.11 饱和度	(20)
第 2 章 地震道反演、AVO 技术	(22)
§ 1 地震道反演	(22)
1.1 引言	(22)
1.2 反褶积	(22)
1.2.1 子波为最小相位时的最小平方滤波方法	(24)
1.2.2 子波为非最小相位时仍用最小平方滤波法的解决办法	(26)
1.3 反演	(33)

1.3.1 线性反演定义、例子及解法	(33)
1.3.2 地震道反演	(34)
1.3.3 震井结合或多参数约束反演	(39)
§ 2 AVO 技术	(51)
2.1 引言	(51)
2.2 基本原理	(51)
2.3 简化的 Zoeppritz 方程中反射系数与岩石物理参数的关系	(52)
2.4 简化 Zoeppritz 方程中截距 P 和斜率 G	(56)
2.5 AVO 技术处理后获得的主要属性剖面	(57)
2.6 AVO 资料解释意义	(58)
2.7 AVO 处理	(59)
第 3 章 提取地震特征信息的其他方法	(65)
§ 1 解析信号分析	(65)
1.1 引言	(65)
1.2 希尔伯特变换的定义	(65)
1.3 希尔伯特变换的条件	(66)
1.4 解析信号的定义和性质	(68)
1.5 解析信号在地震记录上的应用	(68)
1.6 三瞬参数的地震解释	(70)
§ 2 烃类指示	(71)
2.1 烃类概念与油气藏的关系	(71)
2.2 亮点、暗点、平点和极性反转的成因	(72)
2.3 目前烃类指示的内容	(73)
§ 3 地震波形的形态分析	(73)
3.1 引言	(73)
3.2 地震波、地震剖面和地质剖面的关系	(74)
3.3 确定性地震信号的波形分析和频谱分析	(75)
3.4 随机地震信号在时域和频域上的描述	(76)
3.4.1 随机信号的时域描述	(76)
3.4.2 随机信号的频域描述	(79)
3.5 地震 waveform 的主要形态参数	(86)
第 4 章 提高信噪比和分辨率的原理、方法	(93)
§ 1 提高信噪比的原理、方法	(93)
1.1 引言	(93)
1.2 信噪比的多种定义	(93)
1.2.1 地震仪器上信噪比定义	(93)

1.2.2	地震数据处理中信噪比的几种定义	(93)
1.3	提高信噪比的途径和方法	(95)
1.3.1	引言	(95)
1.3.2	时差或视速度的差异	(95)
1.3.3	可预测性的差异	(96)
1.3.4	频率和波数的差异	(97)
1.3.5	射线参数 τ 、 p 的差异	(103)
1.3.6	相干性的差异	(106)
1.3.7	其他特征的差异	(114)
§ 2	提高分辨率的原理、方法	(114)
2.1	引言	(114)
2.2	纵向分辨率	(115)
2.2.1	概述	(115)
2.2.2	零相位子波的分辨率最高	(116)
2.3	有关垂向分辨率的讨论	(116)
2.3.1	用地层顶、底界面的反射波到达时差来定义薄层	(119)
2.3.2	Rayleigh 准则	(119)
2.3.3	Ricker 准则	(119)
2.3.4	Widess 准则	(122)
2.3.5	Kallweit 等用可控震源研究结果	(122)
2.3.6	原苏联顾尔维奇的研究结果	(122)
2.3.7	严格垂直分辨率的定义 (Knapp)	(123)
2.4	横向分辨率	(126)
2.5	影响分辨率的主要因素	(127)
2.5.1	地震子波的主频与频带宽度	(127)
2.5.2	信噪比	(129)
2.5.3	时间、空间采样率	(131)
2.5.4	子波的形状	(132)
2.5.5	地震波的吸收衰减作用	(133)
2.6	改善分辨率的措施	(133)
第 5 章	储层参数分析与预测的若干数学方法	(135)
§ 1	线性回归分析	(135)
1.1	引言	(135)
1.2	常用的多元线性回归和逐步回归	(135)
1.2.1	多元线性回归及其主要步骤	(135)
1.2.2	逐步回归	(136)

§ 2 主成分分析法与 K-L 变换法	(136)
2.1 主成分分析法	(136)
2.2 K L (Karhunen-Loève) 变换法	(137)
2.2.1 K-L 变换的两个重要性质	(138)
2.2.2 协方差矩阵的奇异值 (或特征值) 和对应的特征向量的求法	(138)
§ 3 模式识别	(140)
3.1 引言及例子	(140)
3.2 统计模式识别的四个主要组成部分	(141)
3.3 三种判别方法	(141)
3.4 二个例子	(143)
3.4.1 利用地震特征参数识别油气层	(143)
3.4.2 地震反射层位的自动拾取	(144)
§ 4 聚类分析	(145)
4.1 引言	(145)
4.2 距离	(145)
4.2.1 最短距离法	(146)
4.2.2 最长距离法	(146)
4.2.3 重心法	(146)
4.2.4 类平均法	(146)
4.3 相似系数	(146)
4.3.1 二向量夹角的余弦	(146)
4.3.2 相关系数	(146)
4.4 最常用的系统聚类方法、例子	(147)
§ 5 神经网络及其在信号处理中的应用	(149)
5.1 引言	(149)
5.2 神经元的基本模型 (感知器)	(150)
5.3 网络结构	(151)
5.4 网络的反向传播算法	(151)
5.5 神经网络分离信噪的例子	(154)
§ 6 灰色预测方法简介	(155)
6.1 引言	(155)
6.2 灰色模型	(155)
6.3 地震数据如何适用于灰色模型	(156)
6.4 预测模型 GM ($n, 1$) 的解法	(156)
6.5 利用残差建立新模型来提高预测精度	(158)
§ 7 克立格法简介	(158)

7.1 引言	(158)
7.2 地质统计学与数理统计学的区别	(159)
7.3 区域化变量	(159)
7.4 区域化变量的数字特征与变异函数	(160)
7.5 平稳假设与本征假设	(162)
7.5.1 二阶平稳假设	(162)
7.5.2 本征假设	(162)
7.5.3 二阶平稳假设与本征假设的比较	(163)
7.5.4 准二阶平稳假设与准本征假设	(163)
7.5.5 由变异函数定义推得的几个等式	(163)
7.5.6 实验变异函数的计算公式	(164)
7.6 估计方差	(165)
7.6.1 估计误差与估计方差	(165)
7.6.2 离差方差的定义	(165)
7.7 普通克立格方程组与普通克立格方差	(166)
参考文献	(169)

第 1 章 储层参数及它们之间的关系

§ 1 弹性体简介

1.1 引言

物体（如岩石）受外力作用后就要产生变形，从变形开始到破坏一般可能要经历 2 个阶段，即弹性变形阶段和塑性变形阶段。根据材料特性的不同，有的弹性阶段较明显，而塑性阶段很不明显，（像一般的脆性材料那样，往往弹性阶段后紧跟着就是破坏）；有的弹性阶段很不明显，变形一开始就伴随着塑性变形。因此，弹性、塑性变形总是耦联产生。

由材料力学知道，弹性变形的物体在外力作用下发生变形；当外力停止后，其变形会随之消失。物体在内力作用下恢复原来的形状和大小，这种性质称为弹性；经变形并能立即完全恢复原状的物体称为完全弹性体。塑性变形的物体在外力作用下发生变形，而外力停止后变形并不消失，物体的形状和大小不能复原。只有弹性变形是可逆的，即物体在变形过程中所贮存起来的能量在卸载过程中将全部释放出来，物体的变形可完全恢复到原始状态。在描述物体在外力作用下发生变形之间的关系时需用到应力和应变的概念。

应力是指作用在单位面积上的力，当面积趋于零时的极限值。应力包括法应力和切应力。

应变是当物体受到应力作用，产生体积和形态的变化。应变包括纵向（或胀缩）应变和横向（或剪切）应变，这些应变可用弹性系数来表示。

由于弹性变形是可逆的，如已知应力值，则相应的应变可惟一地确定。

一般来说，当作用力足够小而作用时间也非常短时，许多固体都可以近似地看成弹性体。在地震勘探中，把离震源很近的地方看成破裂带和塑性带，爆炸造成的变形很大，从而岩石不能看成为弹性体。在远离震源的地方，岩石受力很小，作用时间也很短的情况下，岩石可近似地看成是完全弹性体，地震波可看成是岩层中的弹性波。在弹性体中同时存在纵波和横波，纵波的传播速度比横波的传播速度要快，所以纵波总是比横波先到。在电磁波内只有横波，在流体中只有纵波。

我们知道地震理论是研究地震波在地下岩石中传播规律的，一般地震理论可分为地震波运动学和地震波动力学两部分。

地震波运动学是研究地震波的射线或波前的几何传播规律的，它主要用来解决地震波的传播时间问题，而地震波动力学则主要是研究地震波的能量传播问题。

在地震资料数据处理的各种方法中，经常要遇到有关地震波的能量问题，如地震波的

形状、振幅、频谱和地震波的吸收、衰减等。

由于地震波可以看作是在地下岩层中传播的弹性波，在弹性理论中，弹性波方程反映了弹性波的基本传播规律，并能揭露弹性波的本质。为此，我们先介绍一下有关知识。由于弹性波方程的建立和求解要涉及到很多弹性力学和偏微分方程的内容，所以只能简要地介绍一下在地震波动力学中经常用到的弹性系数和弹性波方程的表达形式。

1.2 常用的 5 个弹性系数简介

虎克定律：实验证明，物体在外力作用下发生变形，变形的大小与作用力大小及物体的物理性质有关，即在一定的弹性极限范围内，物体在应力作用下，应力与应变成正比关系。比例系数就是杨氏模量 E 。

可以证明，在各向同性的弹性介质中，广义虎克定律中 36 个弹性系数中只有 2 个是独立的。其中描述弹性特征常用的有以下 5 个弹性系数，即：

1) 杨氏模量 E (或弹性模量)

它是物质对受力作用的阻力的度量。固体介质对拉伸力的阻力愈大，弹性愈好， E 值愈大。其物理意义是使单位截面积的杆件伸长 1 倍的应力值。

2) 泊松比 σ

它表示杆件受载荷作用的相对缩短量（伸长量）与它的截面尺寸相对增大量（缩小量）之比。 σ 的绝对值介于 0~0.5 之间。

3) 切变模量 (或横波模量) μ

它是切应力与切应变的比，是阻止剪切应变的一个度量。流体无剪切模量，即 $\mu = 0$ 。

4) 体积模量 K

它表示物体的抗压缩性质，说明岩石的耐压程度。

5) λ (常把 λ 、 μ 称为拉梅系数)

它是阻止横向压缩所需的拉应力的一个度量。阻止横向压缩的拉应力愈大， λ 值也愈大。

以上 5 个系数是分辨岩性的基本参数。其中，杨氏模量 E 和泊松比 σ 是岩石常用的弹性指标。上面已讲到它们中只有 2 个是独立的，即只要知道了其中的 2 个，其余 3 个就可以按公式推算出来。在实用上常选用拉梅系数 λ 、 μ ，有时也选用 E 、 σ ，它们之间常用关系式为

$$\begin{cases} E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \\ \sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \\ K = \lambda + \frac{2}{3}\mu \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \\ \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)} \\ K = \frac{E}{3(1-2\sigma)} \end{cases} \quad (1.2)$$

各向异性介质的弹性系数较多, 通常有 21 个。

1.3 弹性波方程

在均匀、各向同性和完全弹性介质中, 地震波的传播遵循下列弹性波方程:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla \theta + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1.3)$$

其中 ρ 是介质的密度; λ 和 μ 是介质的弹性系数, 称为拉梅系数; θ 是体积膨胀系数, 在直角坐标系中

$$\theta = e_x + e_y + e_z = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.4)$$

其中 e_x 、 e_y 和 e_z 分别表示沿 x 、 y 和 z 方向的线性膨胀系数; u 、 v 和 w 分别是沿 x 、 y 和 z 方向的位移分量; $\mathbf{u}$ 是介质中质点的位移向量:

$$\mathbf{u} = ui + vj + wk$$

∇ 表示梯度向量算子

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

∇^2 表示拉普拉斯算子

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

对于固体中的位移, 最好引入一个标量势 (或膨胀位移函数) φ 和一个向量势 (或旋转位移函数) Ψ (ψ_x , ψ_y , ψ_z)。根据向量分析可知, 位移向量 $\mathbf{u}$ 可写成下列向量形式:

$$\mathbf{u} = \nabla \varphi + \nabla \times \Psi = \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_s \quad (1.5)$$

其中 $\nabla \varphi$ 表示标量势的梯度

$$\nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} i + \frac{\partial \varphi}{\partial y} j + \frac{\partial \varphi}{\partial z} k$$

$\nabla \times \Psi$ 表示向量势的旋度

$$\nabla \times \Psi = \left(\frac{\partial \psi_z}{\partial y} - \frac{\partial \psi_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial z} - \frac{\partial \psi_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial \psi_y}{\partial x} - \frac{\partial \psi_x}{\partial y} \right) k,$$

表明膨胀位移分量为 $\mathbf{u}_p$, 表明旋转位移为 $\mathbf{u}_s$ 。

把 (1.5) 式代入 (1.3) 式, 得到

$$\rho \nabla \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla^2 \varphi) + \rho \left(\nabla \times \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right) - \mu \nabla^2 (\nabla \times \Psi) = 0$$

容易看出, 如果函数 φ 和 Ψ 各满足下面 2 个独立的波动方程

$$\rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi \quad (1.6)$$

和

$$\rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \Psi \quad (1.7)$$

则前一方程也得到满足。

(1.6) 式和 (1.7) 式分别表示纵波 (或 P 波) 和横波 (或 S 波) 运动的传播。如果把上面 2 个波动方程写成标准形式, 则得到:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = v_p^2 \nabla^2 \varphi \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = v_s^2 \nabla^2 \Psi \quad (1.9)$$

式中 $v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ 和 $v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$, 它们分别表示纵波和横波在介质中的传播速度, 而横波是一个向量, 一般由 3 个函数 ψ_x, ψ_y, ψ_z 来表示。

显然 (1.8) 式和 (1.9) 式为二阶线性偏微分方程式, 求解时当然还要用到初始条件和边界条件。由于地震勘探中目前主要利用纵波, 所以我们常用到的是纵波方程 (1.8)。

我们还可利用求解弹性波方程 (1.3) 的方法, 来讨论地震波的振幅、反射系数和透射系数; 对一些复杂构造地区, 特别是一些地层界面存在间断线或间断点的不连续处还讨论了地震波的绕射; 更进一步还分析了非完全弹性介质中地震波的传播情况, 讨论了地震波的吸收。

1.4 纵波和横波及其速度

1.4.1 纵波和横波

理论和经验证明, 介质中各质点的振动方向和波的传播方向是可以不同的, 是两个完全不同的概念。

介质中各点的振动方向和波的传播方向相垂直的波是横波, 也称 S 波 (Shear)、切变波或剪切波。

介质中各点的振动方向和波的传播方向相同的波就是纵波, 也称 P 波 (Push)、疏密波或压缩波。声波就是纵波。

横波又可分为两种: 质点振动和射线都在通过测线的沿垂直平面内的称直垂偏振横波 (SV 波); 质点在垂直于上述平面内水平振动的称为水平偏振横波 (SH 波)。

平面波在弹性固体分界面上, 当入射波为 P 波或 SV 波时, 既可产生同类的反射波和透射波, 也可产生不同类的反射波和透射波; 当入射波为 SH 波时, 只产生同类的反射波和透射波。因此, 波的传播方向和速度关系符合斯奈耳定律, 这样问题可简化。因此, 在横波勘探中常采用 SH 波。

偏振现象只能用横波才能观察到, 而不能用在空气中的声波使之复现, 因声波为纵波。

1.4.2 纵波和横波的速度

弹性波的速度与岩石物理性质之间的关系由 (1.8)、(1.9) 式和 (1.2) 式知:

$$\text{纵波速度} \quad v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1.10)$$

$$\text{横波速度} \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (1.11)$$

由于 λ 、 μ 和 ρ 都是正数, 所以从上 2 式对比, 显然有 $v_p > v_s$ 。在流体介质中, $\mu = 0$, 则 $v_p = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}}$, $v_s = 0$, 所以横波的传播与纵波不同, 它不受岩石在孔隙中充填的流体影响。

再由上 (1.10) 式、(1.11) 式相除得:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{(1-2\sigma)}} \quad (1.12)$$

如果 v_p 、 v_s 已知时, 可由上式解得:

$$\sigma = \frac{0.5(v_p/v_s)^2 - 1}{(v_p/v_s)^2 - 1} \quad (1.13)$$

据方程组 (1.1) 的第二式

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (1.14)$$

可知当 $\lambda = 0$ 时, $\sigma = 0$; 当介质为流体时, 即 $\mu = 0$ 时, $\sigma = 0.5$ 为最大值。因此, 泊松比 σ 在 $[0, 0.5]$ 范围内。当岩石越坚硬, σ 越小, 岩石越疏松, σ 越大, 尤其是压裂破碎和含流体后的岩石, 泊松比明显增高。对于大多数弹性介质的 σ 值可取 0.25, 代入 (1.12) 式可得 $v_p/v_s = \sqrt{3} \approx 2$, 所以人们常说纵波速度 v_p 约为横波速度的 2 倍。 σ 最小时为零, 代入 (1.12) 式得 $v_p/v_s = \sqrt{2}$, 即纵波速度比横波速度最小也要大 $\sqrt{2}$ 倍, 说明纵波速度永远大于横波速度。因此在远离震源处, 必然纵波先到。

1.5 地震方法研究的主要对象

由于一次爆炸产生的纵波能量比横波要强得多, 因此目前在地震勘探中主要利用纵波。我从接收到的来自不同深度地层分界面的各个反射纵波, 其速度的差别, 在消除埋藏深度的影响后, 也能反映地下岩性的差别。从另一方面来看, 在介质分界面上产生的反射波的强弱与分界面两侧的波阻抗 (ρv) 之差的大小有关 ($\rho_1 v_1 \neq \rho_2 v_2$)。由于各种岩石密度的差别程度要比速度上的差别小得多, 反射强弱主要取决于速度差别的大小, 所以岩层之间速度差异是我们的重要研究对象。

一般地层的分层除了速度和密度 (波阻抗) 外, 还有反映弹性特征的弹性系数。但是, 由于在地震波的传播过程中, 所遇地层的不均匀性和不完全是弹性介质, 因此地震波从一层传播到另一层时, 还要受到不同介质的影响。这些影响有球面扩散、吸收、能量透射损失及波散等, 也是不能忽视的重要因素。

过去的几十年用反射地震方法找油气, 主要是找构造, 即仅对地下地层的几何形态做出描述。现在要求提高了, 不仅要求了解地下地层的几何形态, 更重要的是要求了解地下

的岩性等。

我们知道在研究构造地震学时，主要运用地震波的运动学特征确定波至时间和传播速度，以确定地层上下起伏变化的几何形态；而研究岩性时就必须运用波的动力学特征，结合运动学特征确定各种物性参数，来判断地层的岩性成分，以便直接为找油气服务。它比构造地震学要复杂得多，并更能触及地层的物理本质。这样就必须对储层进行研究，如怎样追踪储层；如何提取储层的各种参数，包括纵波、横波速度，频率，相位，振幅，阻抗，密度，弹性系数，吸收系数及粘滞系数等。根据这些地层岩石的物理性质的差异来分辨、识别、预测岩性，甚至油气层。要想较精确地进行岩性分类，了解地层的岩性和流体等特性，光靠少数几个参数是无法确定的。例如，用单一的速度值区分砂岩和页岩是不可能的，因为它们的速度值变化范围大致相同，即问题是多解的、不惟一的。所以必须应用多种参数、多种资料和手段，用数学的方法进行综合分析来分类、识别才能达到目的。当然，提取这些地震信息，必须在高信噪比、高分辨率、高保真度的基础上来实现；同时还要与井中资料、实验室资料以及地质先验知识等相结合，相互印证。

§ 2 储 层

2.1 储层的概念及其性质

凡具有一定连通孔隙、能使流体储存，并在其中渗滤的岩层就称为储集层或储层。它是地下石油和天然气储存的场所，是构成油气藏的基本要素之一。按储层的含义，并非所有的储层都一定储存油气。那些储存了油气的储层被称之为含油气层、含油层或含气层。

储层中的石油和天然气在运移过程中遇到某种遮挡物，使其不能继续向前运移时，便在储层中的局部地区聚集起来，这种聚集油气的场所称为圈闭（或称油捕）。它圈闭了一定数量的油气后就成为油气藏，只聚集了石油的则称为油藏，只聚集了天然气的称气藏。在储层上方能阻止油气向上逸散的岩层称为盖层。

目前，世界上已发现的绝大多数（99%以上）油气藏的储层是沉积岩，其中又以碎屑岩（其主体为砂岩体）和碳酸盐岩储层为主，仅有少数存在于其他沉积岩、岩浆岩和变质岩中^①。

碎屑岩储层：包括砂砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉细岩以及没有胶结或胶结很松散的砂层，其中以中、细砂岩和粉砂岩储层分布最广，储油物性也好。其孔隙类型以原生的粒间孔隙为主。

碳酸盐岩储层：它的主要岩石类型为石灰岩、白云岩及生物礁等。其储集空间通常包括孔隙、溶洞和裂隙3类。一般说，孔隙和溶洞是主要的储集空间，而裂缝是主要的渗滤通道。

^① 袁炳存、王淑珍、蔡耀芬编。石油地质学。武汉地质学院石油地质教研室，1984。

孔隙性和渗透性是储层的两个基本特性，也是衡量储层性能好坏的基本参数。对于那些孔隙度低、孔径小、连通性不好、渗透性极差的岩石，基本上不能作为储层来考虑。

储层的特性是控制地下油气分布状况、油气储量及产量的重要因素。因此，对油气田的调查、勘探和开发都离不开对储层的研究、分析。

由于储层是横向变化的，其中包括几何形态的上、下起伏及厚薄不同变化，更复杂的还有断层、尖灭等。在同一层内，其岩性在横向上也会变化。

储层的复杂性还与孔隙度、渗透率、粘土含量及裂隙密度等在空间分布的明显不均匀性有关。由于这些不均匀性，光靠少数测井、钻井等资料来外推、预测其结果是不可信的。只有加入地震资料来限制或约束，并进行外推、预测才能使得到的信息更可靠。

无论储层在几何形态上，还是在岩性上，或在其他方面发生横向变化，在地震记录上总会有反映、有变化，尽管这些变化的信息非常复杂、隐蔽地混杂在一起。因此，我们可综合为2个需要解决的问题：首先，如何从非常复杂的地震记录中提取储层的各种地震信息（各种物性、岩性及含油气性等参数），然后选用哪些参数来对储层进行分析、横向预测，识别有利的含油气区；其次，如何利用地震信息对储层进行追踪来预测、确定储层的顶、底界面；对比较复杂的，一般可用多元统计模式识别等方法。

2.2 储层参数及其性质和相互关系

2.2.1 引言

测井资料和实验室资料都是比较精确和高分辨率的资料，而地震资料是较容易获得的大批量地下数据空间资料，其精确度和分辨率都较差些；但它们有许多互补性质。我们可以通过上述3种资料，经过处理（包括反演和特殊处理等）、分析、验证和对比来提取更多、更精确和有意义的地震特征参数信息（主要是储层参数信息）。分析其间的变化规律和相互关系是储层研究的主要任务，也是一种最经济和有效的方法，并可和岩性及含油气性联系起来。油气预测方法的主要问题是较准确地提取这些参数；否则，就会失去它们的原有地质含义。本节主要是将前人通过实验室资料、测井资料等得到的一些经验公式汇聚起来，供参考。地震信息参数很多，黄绪德先生把它们分成以下六大类。

(1) 运动学参数：纵、横波速度 v_p 、 v_s ，波阻抗 I_p 、 I_s ，反射系数 r_p 、 r_s 及它们的比值 ν_p 、 ν_i 、 ν_r ，波散时差 Δt_e ，快慢纵、横波时差 Δt_p 、 Δt_s 等。

(2) 动力学参数：纵、横波振幅 A_p 、 A_s 以及比值 ν_A ，频率 f ，相位 θ ；瞬时振幅 A_i 、瞬时频率 f_i 、瞬时相位 θ_i ；振幅谱 A_f 及各种特征值；AVO 中的各种属性参数等。

(3) 形态学参数：波形特征（视周期、零点个数 n 、极值偏度、自回归系数等）、频谱特征、相关特征及统计特征等。

(4) 弹性参数：杨氏模量 E 、泊松比 σ 、切变模量 μ 、拉梅系数 λ 、体积模量 K 及纵波模量 M 等。

(5) 粘滞性系数：纵、横波的吸收系数 α_p 、 α_s ，品质因子 Q_p 、 Q_s 及粘滞系数 η_p 、 η_s 以及它们的比值 ν_a 、 ν_Q 、 ν_η 。