



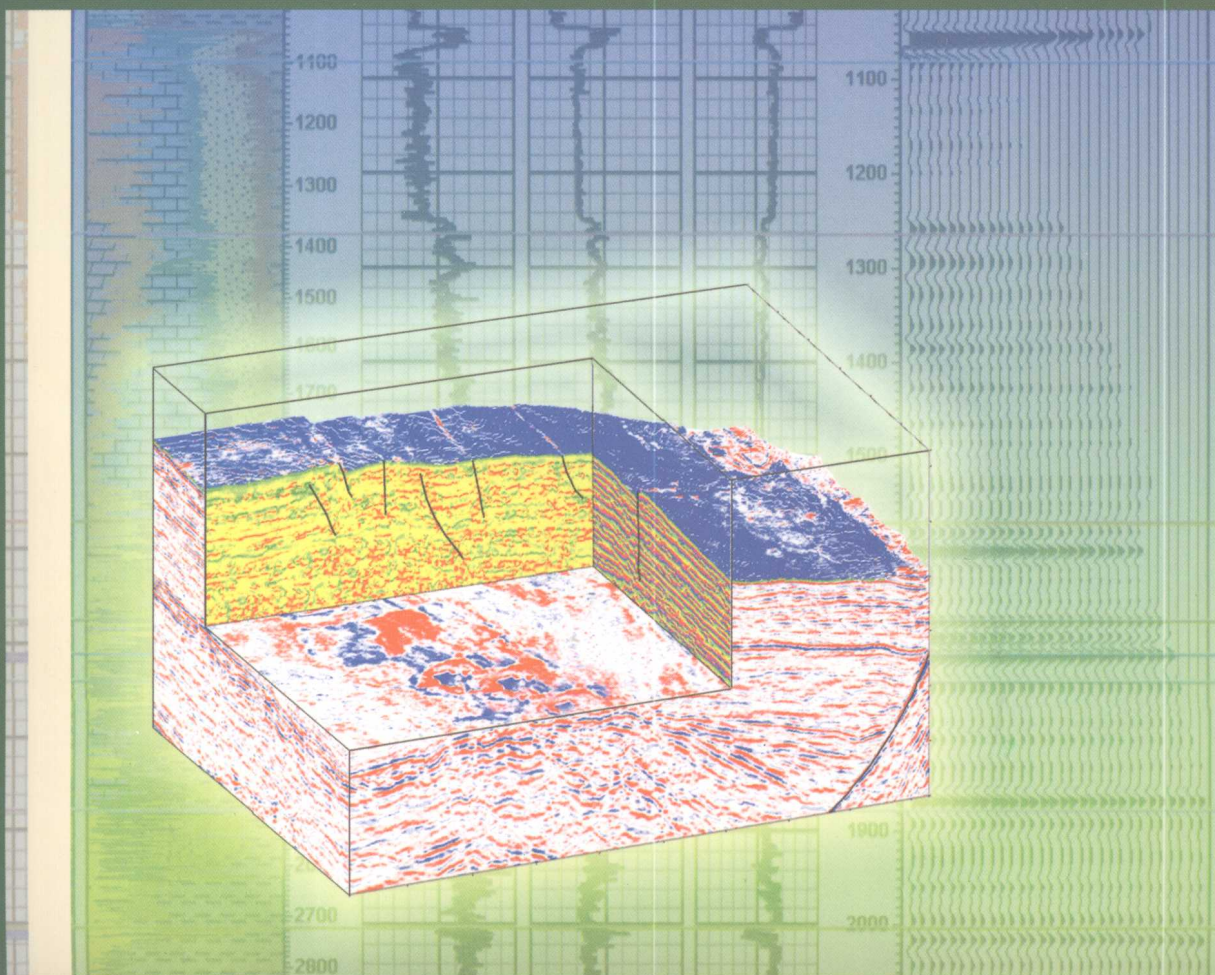
TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

地震资料 综合解释方法

Methods for Seismic Data
Comprehensive Interpretation

■ 王永刚 编著



中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

地震资料综合解释方法

Methods for Seismic Data Comprehensive Interpretation

王永刚 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震资料综合解释方法/王永刚编著. —东营:中国
石油大学出版社, 2007. 5

ISBN 978-7-5636-2245-0

I. 地... II. 王... III. ①地震勘探—数据处理
②地震勘探—地质解释 IV. P631. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 051510 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 地震资料综合解释方法

作 者: 王永刚

责任编辑: 袁超红(电话 0546—8396214)

封面设计: 王凌波

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@163.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392563, 8392791)

开 本: 185×260 印张: 22.625 字数: 579 千字

版 次: 2007 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 33.00 元



内容简介

本书是为地球探测与信息技术、矿产普查与勘探、地质工程、构造地质学等专业硕士研究生编写的专业教材,主要介绍地震勘探资料解释的基础理论和基本方法。全书共分5章,包括地震资料解释的理论基础、地震资料构造解释与应用、储层岩性与物性预测方法、油气预测与烃类检测方法、地球物理资料综合分析方法等内容,书后还附有部分计算和综合分析的习题。

本书结合了研究生课程的教学内容以及当前地球物理勘探方法和技术的发展特点,力求所述内容新颖、方法系统。本书除可用作研究生的教材外,还可供高年级本科学生以及从事石油、天然气、矿产勘探与开发的学者和研究人员参考。

《地震资料综合解释方法》是为地球探测与信息技术、矿产普查与勘探、地质工程、构造地质学等专业硕士研究生编写的教材,主要介绍地震勘探资料解释的基础理论和基本方法。通过本课程的学习可使学生了解地震勘探的基本理论,掌握地震勘探资料解释的基本方法和相关技术,学会使用各种地球物理勘探方法、技术以及对相关的各项地球物理资料进行综合研究和分析的方法,从而为解决油气田勘探开发的各项地质任务打下坚实的专业基础。

本课程于1988年由陆基孟教授首次为硕士研究生开设,当时的课程名称为“地震勘探及资料解释”。自1995年以来,本课程由我承担,并更名为“地球物理资料解释”,2001年后又更名为“综合地球物理方法与应用”。2000年以前,本课程一直沿用陆基孟教授等为物探专业本科生编写的《地震勘探原理》教材。2001年,我在多年从事本课程教学的基础上,通过教学资料的不断积累,在中国石油大学(华东)研究生院、地球资源与信息学院的支持下,编写了“地球物理资料解释”校内胶印的研究生系列教材。经过多年的应用,吸取了广大读者和专家的意见与建议,对教材内容进行了调整、充实和完善,形成了现在的版本。

本教材以地震资料解释方法与技术为核心,主要包括以下5章内容:

第1章为地震资料解释的理论基础,主要讨论了地震剖面的特点、地震勘探的分辨率、反射界面真正空间位置的确定、地震剖面的偏移归位等内容。

第2章为地震资料构造解释与应用,具体讨论了地震资料构造解释中的二维解释和三维解释的基本方法与相关技术、三维地震资料在勘探开发中的应用、地震资料解释中的可视化技术等内容。

第3章为储层岩性与物性预测方法,具体介绍了利用速度资料、波形和频谱信息进行储层岩性预测的方法和时频分析方法;介绍了振幅信息分析与应用的相关技术,如AVO技术、薄层分析技术等;还介绍了储层参数预测方法,包括统计拟合方法、克里金方法、相关滤波方法、协克里金方法、神经网络方法、非参数回归分析方法等。

第4章为油气预测与烃类检测方法,讨论了油气预测的基本问题,如主要储集层类型与特点、含油性预测的条件分析和地震资料品质的量化分析方法;介绍了烃类检测方法,包括亮点技术、AVO资料的烃类检测技术、地震属性分

析技术、因子分析方法、聚类分析方法、利用 Kohonen 网络进行模式分类等;还介绍了含油性预测方法,包括 RS 理论及其决策分析方法、模糊神经网络储层油气预测技术、支持向量机储层油气预测技术等;最后讨论了储层预测结果的评价与检验方面的相关问题。

第 5 章为地球物理资料综合分析方法,具体讨论了开展综合分析的必要性、地球物理资料综合应用的有关问题、地震和测井以及地质资料的综合应用、地球物理资料综合处理方法、地震资料交互解释系统及其解释流程。

教材的最后还附有部分计算和综合分析的习题。

石油地球物理勘探技术的迅猛发展、计算机技术的广泛应用把地球物理资料综合应用和解释提到了一个新的技术水平。本教材在编写过程中参考了国内外相关教材和论著以及互联网资料,并针对研究生课程的教学内容以及当今地球物理勘探方法和技术的发展特点,形成了内容新颖、方法系统、技术先进的,可供从事石油、天然气、矿产勘探与开发的学者和研究者参考的教材。

在教材的编写过程中,得到了中国石油大学(华东)各级领导和许多教授的支持与帮助,也得到了中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司以及相关部门厂矿院所专家的关心、支持与协助,他们为本教材的编写提供了丰富的资料与图件。在本教材初稿完成之际,胜利油田韩文功总工程师、中国石油大学(华东)地球资源与信息学院印兴耀教授认真细致地审阅了全部内容,提出了许多中肯建议。中国石油大学(华东)地球资源与信息学院地球物理系乐友喜教授编写了第 3 章第 3.3 节、第 4 章第 4.2 节和第 4.3 节中的部分内容,我的研究生也参加了本教材部分图件的计算与绘制。在此一并向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

王永刚

2006 年 5 月

目
录

第 1 章 地震资料解释的理论基础	1
1.1 地震剖面的特点	2
1.1.1 地震记录面貌的形成	2
1.1.2 水平叠加剖面的特点	6
1.2 地震勘探的分辨率	8
1.2.1 分辨率的定义、基本准则与定量表示	8
1.2.2 影响分辨率的主要因素	11
1.2.3 提高分辨率的途径	17
1.3 反射界面真正空间位置的确定	22
1.3.1 水平叠加剖面存在的主要问题及解决途径	22
1.3.2 三个角度、三个深度之间的关系	23
1.4 地震剖面的偏移归位	26
1.4.1 地震偏移技术的发展概况	26
1.4.2 各种偏移方法的基本原理	27
1.4.3 二维偏移与三维偏移	32
1.4.4 时间偏移和深度偏移	36
参考文献	41
第 2 章 地震资料构造解释与应用	43
2.1 地震资料的二维解释	43
2.1.1 时间剖面的对比	43
2.1.2 时间剖面的地质解释	46
2.1.3 特殊地质现象的解释	52
2.1.4 构造图、等厚图的绘制	58
2.1.5 小 结	60
2.2 地震资料的三维解释	61
2.2.1 水平切片的解释	61
2.2.2 相干数据体的解释	66
2.2.3 三维数据体全三维解释的基本思路	81

2.3	三维地震资料的应用实例	88
2.3.1	三维地震资料在勘探阶段的应用实例	88
2.3.2	三维地震资料在开发阶段的应用实例	92
2.4	地震资料解释中的可视化技术	107
2.4.1	可视化技术的基本原理	108
2.4.2	数据体可视化方法	111
2.4.3	三维可视化解释	112
2.4.4	浸入式可视化技术	113
2.4.5	可视化技术的软件开发	124
	参考文献	129
第3章	储层岩性与物性预测方法	132
3.1	储层岩性预测方法	132
3.1.1	波场信息及地质含义	132
3.1.2	地震波速度信息用于岩性解释的基础	133
3.1.3	利用速度信息划分岩性	134
3.1.4	利用速度资料估算砂泥岩百分比的方法	139
3.1.5	利用波形和频谱信息估计岩性	146
3.1.6	时频分析方法的利用	157
3.2	振幅信息分析与应用	160
3.2.1	振幅信息在岩性解释和油气检测中的重要性	161
3.2.2	影响振幅的各种因素	161
3.2.3	叠前振幅信息的利用——AVO技术	162
3.2.4	薄层反射振幅信息的利用	168
3.3	储层参数预测方法	185
3.3.1	储层参数转换中的统计拟合方法	186
3.3.2	储层参数转换中的克里金方法	193
3.3.3	储层参数转换中的相关滤波方法	199
3.3.4	储层参数转换中的协克里金方法	203
3.3.5	储层参数转换中的神经网络方法	206
3.3.6	储层参数转换中的非参数回归分析方法	214
	参考文献	219
第4章	油气预测与烃类检测方法	220
4.1	油气预测的基本问题	220
4.1.1	主要储层类型与特点	220
4.1.2	含油性预测的条件分析	227
4.1.3	地震资料品质的量化分析方法	231
4.2	烃类检测方法概述	232
4.2.1	亮点技术	232
4.2.2	AVO资料的烃类检测技术	238

4.2.3 地震属性分析技术	249
4.2.4 因子分析方法	260
4.2.5 聚类分析方法	268
4.2.6 利用 Kohonen 网络进行模式分类	271
4.3 含油性预测方法介绍	276
4.3.1 RS 理论及其决策分析方法	276
4.3.2 模糊神经网络储层油气预测技术	282
4.3.3 支持向量机储层油气预测技术	290
4.4 储层预测结果的评价与检验	307
参考文献	309
第 5 章 地球物理资料综合分析方法	311
5.1 开展综合解释的必要性	311
5.1.1 减少多解性	312
5.1.2 克服局限性	312
5.1.3 避免观测误差及各种干扰	313
5.2 地球物理资料的综合应用	314
5.2.1 地球物理方法的综合应用	314
5.2.2 不同地质任务的综合方法应用	314
5.2.3 地球物理资料综合解释	315
5.3 地震、测井、地质资料的综合解释	316
5.3.1 基本流程	316
5.3.2 三种资料各自的特点	317
5.3.3 三种资料综合解释的典型实例	318
5.4 地球物理资料综合处理方法	324
5.4.1 工作步骤	324
5.4.2 信号检测与估计的基本方法	325
5.4.3 地球物理资料综合处理算法	331
5.5 地震资料的交互解释	337
5.5.1 解释工作站	337
5.5.2 交互解释的概念	339
5.5.3 交互解释的基本流程	340
参考文献	347
习 题	348

第1章

地震资料解释的理论基础

地震波的基本理论包括运动学和动力学两大部分。与物理学中的几何光学相类似,地震波运动学研究地震波波前的空间位置与其传播时间的关系,采用波前、射线等几何图形来描述波的运动过程和规律,如反射定律、透射定律、斯奈尔(Snell)定律、费马(Fermat)原理、惠更斯(Huygens)原理等,因此,地震波运动学也称为几何地震学。地震波动力学是相对于运动学而言的,主要是从波的能量角度来研究其传播特征,如波的振幅、波形、频率、吸收、极化特点等。

回顾地震勘探的整个历程,在相当长的一段时期内主要还是通过研究地震波的运动学特点来推断地下的构造形态,从而间接地寻找油气藏。随着油气勘探难度的加大,用地震波运动学理论解决日趋复杂的油气勘探问题的局限性越来越明显。从20世纪70年代开始,由于上述原因以及数字化和计算机技术的飞速发展,使得地震波动力学问题的理论研究和实际应用都成为可能,而且实践也证明了这些方法的成效。亮点技术、幅距分析(Amplitude Versus Offset, AVO)技术、波动方程模拟、波动方程偏移和反演等新方法、新技术就是最具代表性的几个方面。

地震波实质上是在地下岩层中传播的弹性波。由于弹性波传播的基本规律是由弹性波的波动方程来反映的,因此,讨论地震波的动力学问题就是讨论波动方程的建立和它的求解问题,以及由此得出的结论在地震勘探中的具体应用等。

地球物理勘探方法之一的地震勘探主要包括三大环节,即地震资料的野外采集、数字处理和资料解释。地震资料的野外采集是根据油田的勘探或开发部署,由物探公司组织专门的地震队实施。野外采集的主要工序包括测量、激发(钻激发井、下炸药人工爆炸或使用可控震源,海上则使用空气枪)和接收(使用检波器、采集站、电缆和数字地震仪等设备),涉及的主要方法和技术有观测系统设计、组合和多次覆盖等。野外采集的主要成果是测量数据、施工班报及大量的原始地震记录数据。

地震资料数字处理是地震勘探三大基本生产环节(采集、处理、解释)的中间环节,它既要适应野外数据采集条件多变的情况,又要满足资料解释的各种要求。地震资料数字处理是指用计算机处理和分析野外数据采集的原始资料,为解释人员提供真实反映地下地质构造变化的剖面或数据体。为此,除了需要专门的硬件设备外,还需要专门的数字处理软件系统。衡量一个处理系统的好坏,既要考虑各种处理功能是否齐全,又要考虑处理效果和效率是否完美可靠、经济高效。从野外采集的原始地震信息到可供解释人员使用的数据体或剖面,这期间经历了一系列的加工、处理流程,例如要经历输入→预处理→滤波→反褶积→速度分析→动、静校正→叠加→偏移→输出等流程。一个处理流程包括许多处理步骤,每一个处理步骤又要涉及许多处理模块。因此,处理模块是处理流程中的最小组成单元,是完成某

一处理或分析功能的独立程序。

地震资料的野外采集和室内处理涉及基础资料的操作,而地震资料解释就是把这些资料转化成抽象的地质术语,即根据地震资料确定地质构造形态和空间位置,推测地层的岩性、厚度及层间接触关系,确定地层含油气的可能性,为钻探提供准确井位等。很显然,这种转化和转化的质量是每个解释人员的能力、想象力的综合表现,最终的成果体现在地质解释的合理性上。所以我们说,地震资料解释是一门实践性很强的工作,是一门科学,也是一门艺术和技术。它不仅要有理论 and 具体的操作规范,还要求解释人员要有丰富的想象能力、实践经验和操作技能。

地震资料解释大致可分为三个阶段,即构造解释、地层岩性解释和开发地震解释。20 世纪 70 年代以前,在解决地质问题的过程中,地震勘探方法和技术主要以地震资料的构造解释为主,即利用由地震资料提供的反射波旅行时、速度等信息,查明地下地层的构造形态、埋藏深度、接触关系等。在这一阶段,地震勘探技术在各种构造圈闭油气藏的勘探中作出了重大贡献。但是,随着人类对能源需求的不断增长及构造油气藏的大量发现和开发,比较容易找到的构造油气藏已经越来越少,于是人们不得不设法寻找非构造油气藏。与此相应,在地震勘探技术发展的基础上,对地震资料的解释工作也提出了更高的要求。于是,在 20 世纪 70 年代后期出现了地震资料的地层岩性解释。这一阶段包括两部分内容:一是地震地层学解释,即根据地震剖面特征、结构来划分沉积层序,分析沉积岩相和沉积环境,进一步预测沉积盆地的有利油气聚集带;二是地震岩性学解释,它是采用各种有效的地震技术(如地震资料的各种分析及特殊处理方法),提取一系列地震属性参数,并综合利用地质、钻井、测井资料,研究特定地层的岩性、厚度分布、孔隙度、流体性质等。油田进入开发阶段后,地震技术为开发服务,于是产生了开发地震解释。开发地震解释包括油藏精细描述、储层参数预测、油藏动态监测等。

本章主要介绍与地震资料解释(如构造解释、岩性解释和综合解释等)有关的一些理论问题,包括地震记录的形成以及地震剖面的特点、地震勘探的分辨率、反射界面真正空间位置的确定、地震剖面的偏移归位等内容。

1.1 地震剖面的特点

1.1.1 地震记录面貌的形成

在地震资料野外采集时,震源爆炸产生的尖脉冲在爆炸点附近的介质中以冲击波的形式传播。当冲击波传播到一定距离时,波形逐渐稳定,形成地震子波。地震子波在向下传播过程中,遇到波阻抗分界面就会发生反射和透射。最后,地震子波从地下各个反射界面反射回地面而被地面检波器接收。这些反射子波的振幅有大有小、极性有正有负(主要取决于反射系数的数值和正负),到达地面的旅行时间有先有后(取决于反射界面的埋藏深度和波速)。以上是地震记录面貌形成的物理过程,它可以概括为以下的数学模型。

1. 地震记录的数学模型

通常,地震道 $f(t)$ 是由有效波 $s(t)$ 和干扰波 $n(t)$ 叠加组成的,即:

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (1-1-1)$$

此处的有效波 $s(t)$ 是指一次反射波。对反射波法地震勘探而言,除一次反射波以外的一切波都是干扰波。层状介质的一次反射波通常用线性褶积模型表示,即:

$$s(t) = w(t) * r(t) = \int_0^T w(\tau) r(t-\tau) d\tau \quad (1-1-2)$$

式中, $w(t)$ 为系统子波; $r(t)$ 为反射系数序列; 符号“ $*$ ”表示褶积运算。

系统子波是由震源子波 $o(t)$ 经地层滤波器 $g(t)$ 形成地下子波 $w_1(t)$, 然后逐层反射—折射[透过响应 $\tau(t)$]—反射,最后被地面接收器 $d(t)$ 接收,并由仪器 $i(t)$ 记录后形成的。它是除反射系数以外的综合影响的结果。地层响应、透过响应、接收器响应、仪器响应都是滤波作用,对震源子波滤波相当于它们的时间域响应与子波连续褶积,即:

$$\begin{aligned} w(t) &= o(t) * g(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) \\ &= w_1(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) \end{aligned} \quad (1-1-3)$$

将式(1-1-3)代入式(1-1-2)得:

$$\begin{aligned} s(t) &= o(t) * g(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) * r(t) \\ &= w_1(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) * r(t) \\ &= o(t) * f_e(t) * f_a(t) * r(t) \end{aligned} \quad (1-1-4)$$

式中, $f_e(t) = g(t) * \tau(t)$ 为大地滤波器; $f_a(t) = d(t) * i(t)$ 为接收滤波器。

干扰波由非激发干扰 $n_0(t)$ 、噪音背景 $n_1(t)$ 及规则(相干)干扰 $N(t)$ 叠加而成,即:

$$n(t) = n_0(t) + n_1(t) + N(t) \quad (1-1-5)$$

规则干扰 $N(t)$ 分两类。一类与地质结构有关,称第一类规则干扰 $N_1(t)$,包括多次波、转换波、反射-折射波、断面波、绕射波、伴随波、折射波、瑞利(Rayleigh)波、勒夫(Love)波、斯通利(Stoneley)波等。这类波在某些特定条件下可视为有效波。另一类与地质结构无关,称第二类规则干扰 $N_2(t)$,包括水中鸣震、气泡效应、地表及海面散射等多次波。规则干扰与反射率函数有关,可用一类特殊子波 $w_m(t)$ 与反射系数函数褶积形成的特殊的多次波模型代表,即:

$$s_m(t) = w_m(t) * r(t) \quad (1-1-6)$$

式(1-1-6)可能是线性的,也可能是非线性的。

地震道的褶积模型有多种表达方式。根据频谱定理,式(1-1-2)的时间域褶积在频率域中就是乘积关系,即:

$$S(j\omega) = W(j\omega) \cdot R(j\omega) \quad (1-1-7)$$

式中, $S(j\omega)$, $W(j\omega)$, $R(j\omega)$ 分别为 $s(t)$, $w(t)$ 及 $r(t)$ 的傅里叶(Fourier)变换。

它们的复数形式可分解为振幅谱及相位谱两部分,即:

$$\left. \begin{aligned} S(j\omega) &= S(\omega) \cdot e^{-j\theta_S(\omega)} \\ W(j\omega) &= W(\omega) \cdot e^{-j\theta_W(\omega)} \\ R(j\omega) &= R(\omega) \cdot e^{-j\theta_R(\omega)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-8)$$

三者之间的振幅谱和相位谱分别为:

$$S(\omega) = W(\omega) \cdot R(\omega) \quad (1-1-9)$$

$$\theta_S(\omega) = \theta_W(\omega) + \theta_R(\omega) \quad (1-1-10)$$

上面两式表明:地震道的振幅谱是子波振幅谱与反射系数振幅谱的乘积,它的相位谱是子波相位谱与反射系数相位谱之和。利用功率谱与振幅谱的平方成正比的关系,则有:

$$S^2(\omega) = W^2(\omega) \cdot R^2(\omega) \quad (1-1-11)$$

或者

$$P_S(\omega) = P_W(\omega) \cdot P_R(\omega) \quad (1-1-12)$$

若以离散形式表示,则式(1-1-2)变为:

$$s_i = w_i * r_i = \sum_{k=0}^m w_k r_{i-k} = \sum_{k=0}^p r_k w_{i-k} \quad (1-1-13)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} s_i &= (s_0, s_1, s_2, \dots, s_n) \\ w_i &= (w_0, w_1, w_2, \dots, w_m) \\ r_i &= (r_0, r_1, r_2, \dots, r_p) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-14)$$

s_i, w_i, r_i 分别为地震有效波、系统子波及反射系数的时间序列,长度分别为 $n+1, m+1$ 及 $p+1$,一般有 $m < n, p < n$ 。这是一个线性方程组,可表示为如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0 & w_{-1} & \cdots & w_{-p} \\ w_1 & w_0 & \cdots & w_{1-p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n & w_{n-1} & \cdots & w_{n-p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ \vdots \\ r_p \end{bmatrix} \quad (1-1-15)$$

由于子波为物理可实现序列,故 $w_{-k} = 0$;又因为子波长度为 $m+1$,故 $w_{k>m} = 0$ 。因而有:

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0 & 0 & \cdots & 0 \\ w_1 & w_0 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ w_m & w_{m-1} & \cdots & w_0 \\ 0 & w_m & \cdots & w_1 \\ \vdots & 0 & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ \vdots \\ r_p \end{bmatrix} \quad (1-1-16)$$

矩阵式(1-1-16)可写成如下的向量形式:

$$s = wr \quad (1-1-17)$$

式中, s 为 $n+1$ 阶地震记录道的列向量; w 为 $(n+1) \times (p+1)$ 阶的子波矩阵; r 为 $p+1$ 阶反射系数列向量。

如果用 Z 变换表示上述地震记录的褶积,则有:

$$S(z) = W(z) \cdot R(z) \quad (1-1-18)$$

式中, $z = e^{j\omega}$ 表示离散序列中延迟一个样点, $z_n = e^{jn\omega}$ 即为延迟 n 个样点。

例如,某个子波的时间序列为 $W_i = \{1, 0, 2, 4\}$,则它的 Z 变换为:

$$W(z) = 1 + 2z^2 + 4z^3 \quad (1-1-19)$$

如果用拉普拉斯(Laplace)变换来表示上述地震记录的褶积过程,则在 S 平面上,式(1-1-2)变为:

$$S(S) = W(S) \cdot R(S) \quad (1-1-20)$$

$S^{-1} = e^{j\omega} = Z$ 表示延迟一个样点,于是式(1-1-19)成为:

$$W(S) = 1 + 2S^{-2} + 4S^{-3} \quad (1-1-21)$$

如果用拉普拉斯- Z 变换形式,即 $S_z = e^{j\omega}$ 来表示式(1-1-19),则有:

$$W(S_z) = 1 + 2S_z^2 + 4S_z^3 \quad (1-1-22)$$

而式(1-1-9)可表示为:

$$S(S_z) = W(S_z) \cdot R(S_z) \quad (1-1-23)$$

上面介绍的地震记录数学关系的一系列表示式,如时间域表示式(1-1-2)、频率域表示式(1-1-7)、离散表示式(1-1-13)、向量表示式(1-1-17)、Z变换表示式(1-1-18)、拉普拉斯变换式(1-1-20)及拉普拉斯-Z变换式(1-1-23),它们都是等效的。

大量事实表明:利用声波测井资料和其他资料换算出反射率函数 $r(t)$,并选用合适的地震子波 $w(t)$,计算出的人工合成地震记录与对应的井旁地震记录大都符合较好。由此可见,这一套地震记录形成的理论(也称地震记录的褶积模型理论)是基本符合客观实际的,且是正确合理的(图1-1-1)。

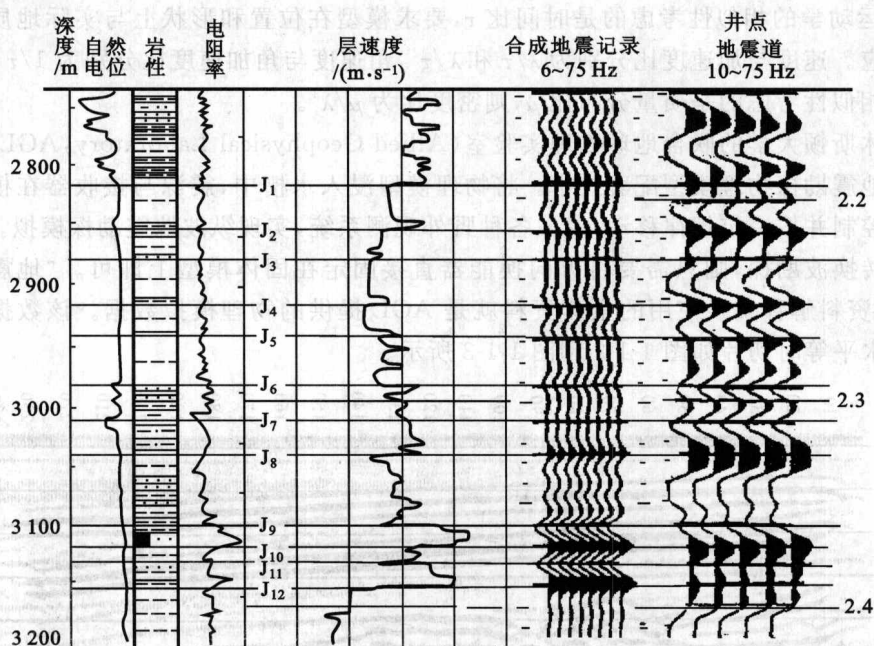


图 1-1-1 人工合成地震记录实例^[1]

以上是一道地震记录面貌形成的机理。在实际中,用于解释的是由许多地震道依次排列起来的地震剖面或地震数据体。各种不同类型和传播特点的波的同相轴[在地震记录上相同相位(如波峰或波谷)的连线叫做同相轴]在地震剖面上会表现出不同的特点。进行地震资料解释时,这些特点是我们在地震剖面上识别各种波的主要依据。

2. 地震剖面的正演模拟

在地震资料的构造或岩性解释过程中,经常需要根据解释结果建立研究区的典型“地质概念模型”。模型是真实地质现象的简化,其中只包含影响地震剖面上最重要的因素,如速度、密度、地层厚度、界面空间形态等。根据给定的地质模型,利用计算机直接模拟该模型的地震响应。模拟过程通常是反复迭代的,模拟结果非常有利于理解不同类型的地质特征在地震剖面上的表现形式。

计算机模拟的实现方法有很多种。例如,褶积模型的逐道循环法;射线追踪法,即根据斯奈尔定律,射线在穿过或遇到层位时改变方向;基于波动理论的波动方程有限差分法、克

希霍夫(Kirchhoff)积分法、频率波数域法等。

数值模拟结果可以是自激自收地震剖面,也可以是不同偏移距的共炮点或共中心点道集记录,主要用于理论研究或解释成果的分析论证。

上述方法也同样适用于三维情况,只是在算法上和具体实现时相对复杂而已。

3. 地震勘探的物理模型技术

地震勘探的物理模型技术利用一定的物理设备,模仿野外的激发和接收方式,对采集的模型记录进行一系列处理,得到用于理论研究的地震剖面或地震数据体。具体实现时必须考虑所建模型与实际地质体的相似性,包括几何相似性、运动学和动力学特征的相似性等。用相应的比例将地质模型缩小,各层的角度与实际地层的角度相同,则可满足物理模型与地质体的结合相似性。如果长度方向缩小的比例是 λ ,则面积缩小的比例是 λ^2 ,体积缩小的比例是 λ^3 。运动学的相似性考虑的是时间比 τ ,要求模型在位置和形状上与实际地质体产生相似的响应。速度与加速度比分别为 λ/τ 和 λ/τ^2 ,角速度与角加速度比分别为 $1/\tau$ 和 $1/\tau^2$ 。动力学的相似性考虑的是质量分布比 μ ,则密度比为 μ/λ^3 。

美国休斯顿大学的联合地球物理实验室(Allied Geophysical Laboratory, AGL)拥有比较完善的地震勘探物理模型配套技术。将物理模型浸入水槽中,震源与接收器在模型上方由计算机控制并按一定规律移动,模拟各种野外观测系统,实现纵波地震勘探模拟。如果模拟横波和转换波勘探,则只需要将方向换能器直接固定在固体模型上即可。“地震勘探原理”课程的资料解释实践使用的全套资料就是 AGL 提供的物理模拟数据。该数据体的地震剖面和水平等时切片如图 1-1-2 和图 1-1-3 所示。

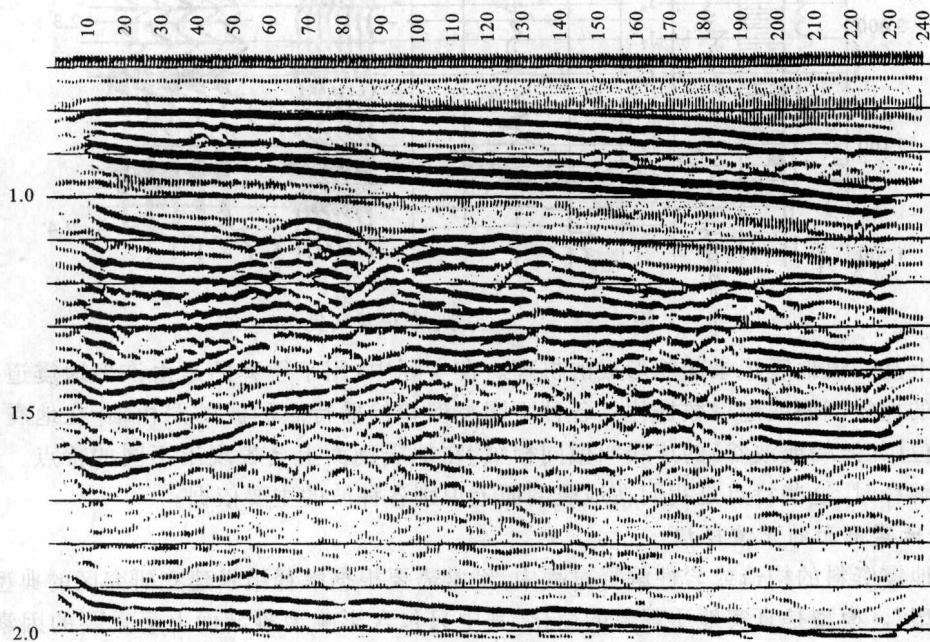


图 1-1-2 物理模型数据体的 Line 75 剖面^[5]

1.1.2 水平叠加剖面的特点

经过水平叠加后得到的时间剖面,已相当于在地面各点自激自收的剖面。在地层倾角

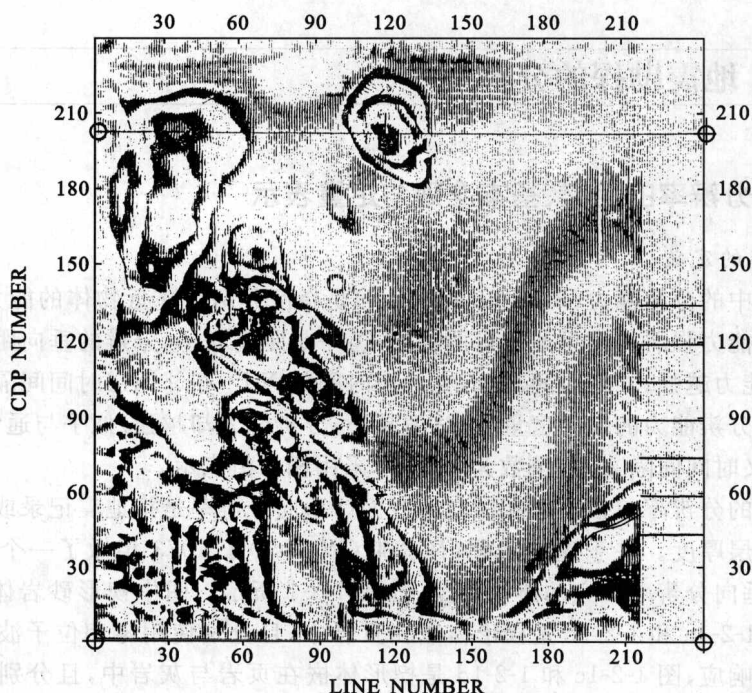


图 1-1-3 物理模型数据体中 $t_0 = 1140$ ms 的水平切片^[5]

小、构造简单的情况下,它一般能较直观地反映地下地质构造特征,同时保留了各种地震波的现象和特点,为我们进行地质解释提供了直观而丰富的资料。

但是我们必须十分清楚地认识到,时间剖面并不是沿测线铅垂向下的地质剖面。它们之间存在许多重要差别,这表现在:

(1) 在测线上同一点,根据钻井资料得到的地质剖面上的地层分界面与时间剖面上的反射波同相轴,在数量上、出现位置上常常不是一一对应的。

(2) 时间剖面的纵坐标是双程旅行时 t_0 ,而地质剖面或测井资料是以铅垂深度表示的。两者需经时深转换,其媒介就是地震波的传播速度。它通常随深度或空间而变化。

(3) 时间剖面上的反射波振幅、同相轴及波形本身就包含了地下地层的构造和岩性信息,如振幅的强弱与地层结构、介质参数密切相关。但是,反射波同相轴是与地下的分界面相对应的,一个界面的反射特性又与界面两侧的地层、岩性有关。也就是说,一个反射波的特点并不是与一个地层简单对应的,而是与界面两侧的介质参数有关。因此,必须经过一些特殊处理(如波阻抗反演技术等)才能把反射波所包含的“界面”的信息转换成为与“层”有关的信息,这时才能与地质和钻井资料进行直接对比。

(4) 地震剖面上的反射波通常是由多个地层分界面上振幅有大有小、极性有正有负、到达时间有先有后的反射子波叠加、复合的结果。复合反射子波的形成取决于地下一组靠得很近的地层结构的稳定性,如薄层厚度、岩性、砂泥岩比等。

(5) 在水平叠加剖面上,常会出现各种特殊波,如绕射波、断面波、回转波、侧面波等。这些波的同相轴形态并不表示真实的地质形态,它们在三维偏移剖面上不可能见到。

1.2

地震勘探的分辨率

1.2.1 分辨率的定义、基本准则与定量表示

1. 分辨率的定义

日常生活中的分辨能力(Resolving Power)是指区分两个靠近物体的能力,通常以绝对值表示。分辨能力强弱的度量通常有两种方式:一是距离表示,分辨的垂向距离或横向范围越小,则分辨能力越强;二是时间表示,在地震时间剖面上,相邻地层时间间隔 Δt 越小,则分辨能力越强。分辨能力的这种度量方式(值越小,分辨能力却越强)似乎与通常的理解相反,为此,我们定义时间间隔 Δt 的倒数为分辨率,采用相对值表示。

地震勘探的分辨率包括垂向和横向两方面。垂向分辨率是指地震记录或地震剖面上能分辨的最小地层厚度。关于这个问题,怀德斯(Widess)于1973年做了一个很好的模型研究,现已成为垂向分辨率研究的典型模型,如图1-2-1所示。图中楔形砂岩体的厚度为0~75 m,其中图1-2-1a和1-2-1b是楔形体嵌在页岩中,且分别使用零相位子波和最小相位子波所得的地震响应;图1-2-1c和1-2-1d是楔形体嵌在页岩与灰岩中,且分别使用零相位子波和最小相位子波所得的地震响应。地震勘探的垂向分辨率一般在1/4波长到1/8波长之间。例如,地震子波的主频为30 Hz,波速为2 700 m/s,波长为90 m,则垂向分辨率为11.2~22.5 m。

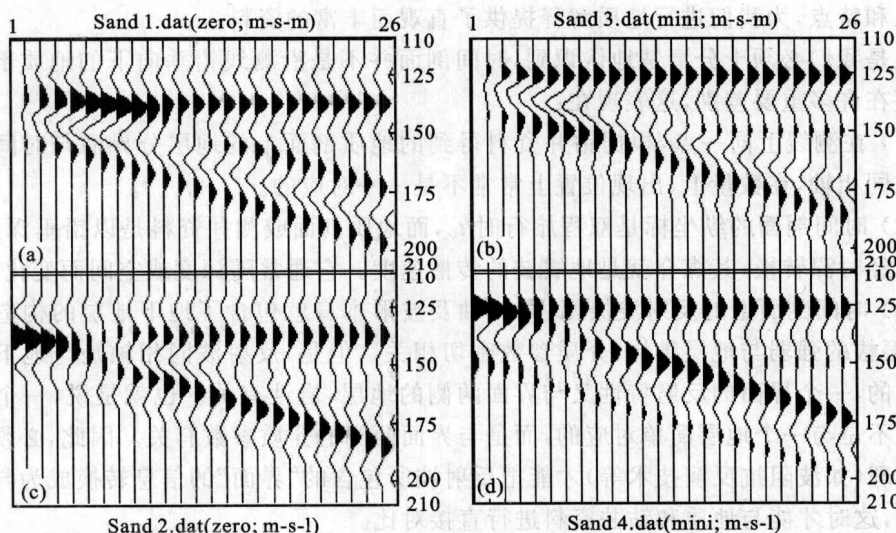


图 1-2-1 Widess 模型的地震响应

横向分辨率(空间分辨率)是指在地震记录或水平叠加剖面上能分辨相邻地质体的最小宽度。横向分辨率通常由第一菲涅尔(Fresnel)带的大小来确定,其半径 R 为:

$$R = \frac{v_{av}}{2} \sqrt{t_0 / f_m} \quad (1-2-1)$$

式中, v_{av} 为平均速度; t_0 为双程反射时间; f_m 为地震波的主频。

由于实际生产中总是要进行偏移处理,经偏移处理后的第一菲涅尔带的半径会大大减