

石油工业出版社

反射波地震勘探技术

(修订本)

24528 P631.425
002(-)

反射波地震勘探技术

(修订本)

牛毓荃 陈俊生 张淑敏等 编

石油工业出版社

内 容 提 要

此修订本以精炼、通俗的语言概括了反射波地震勘探的基础理论和基本技术。在修订中除保留了原版本中有关多次覆盖方法和亮点、平点技术外，并增加了地震波动、激发、传播特征及地震数据的采集、仪器因素的选择和反褶积技术、子波处理、偏移方法分析、三维地震勘探等。

本书由牛毓荃、陈俊生、张淑敏同志修订，并由牛毓荃同志对全书进行了校审。

修订后的版本可做物探工程技术人员自学用书或培训教材，也可供有关领导、地质专业人员学习地震勘探基本知识时参考。

反射波地震勘探技术

(修订本)

牛毓荃 陈俊生 张淑敏等 编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

通县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 16⁷/₈印张 5 插页 385千字 印1—1,960

1985年9月北京第1版 1985年9月北京第1次印刷

书号：15037·2497 定价：3.20元

修 订 版 序

自1978年本书初版以来，地震勘探技术又有了新的、重要的进展。其着眼点是寻找“隐蔽”、“复杂”的油气藏和在油田开发中运用地震技术。其特点是特别重视野外工作方法，尤其是高分辨率地震勘探的野外工作方法；在处理工作中特别注意偏移技术和子波提取及处理（主要运用反褶积技术）方法；三维地震工作取得了很大成功并日益被广泛采用。修订本书就是以此为出发点的。

新增补的第一章至第五章主要是讲野外工作方法及其预备知识的。掌握这五章的内容就可以把实际野外工作设计建立在理论的基础上，而不是仅仅从实验出发。作为本书新添内容的第九章“反褶积技术与子波处理”、第十章“偏移方法分析”、第十五章“三维地震勘探”的内容则不言自明。

修订过程中将原书第一章扩编为第六、第七两章，即把数字处理单列为一章，其他各章仅作了一些不大的改动，更换了部分图件。部分章节，如“多次覆盖的地质效果”，原来目的是宣传、推广这项技术。虽然这一目的现已达到，但从历史的角度考虑，仍然保留下来了。

原来参加本书编写工作的有陈俊生、牛毓荃、张淑敏、吕学谦、王友仁、康盛铨、李克绳等同志。本版的修订工作是由陈俊生、张淑敏、牛毓荃三同志完成的。其中，陈俊生同志编写了第十章；张淑敏同志编写了第十五章；牛毓荃同志编写了第一至第五章和第九章，并对全书做了校订与修改。

金问心同志为本书清绘了部分图件，特此致谢。

原 序

地震勘探在发现油气田过程中的作用是很显著的。地震勘探技术随着地质任务的需要逐步得到发展。早期的地震勘探，在获得地震原始记录之后，人们只是唯一地利用地震信号中的反射时间，借此推断地下构造的几何形态。虽然从开始应用反射波法地震勘探以来，就已经认识到在接收的地震反射信号中包含许多有用的信息，尤其是反射波的振幅，更是值得研究的对象。为此，在后来设计的各种增益控制方案中，曾努力设法保留相对振幅，至少想保留反射波与其背景的相对振幅。但是，由于以往地震勘探仪器的精度不高，相对振幅的保持工作在将近20年漫长时间里未能取得有意义的进展。从六十年代开始，逐渐地引进了二进制增益系统和浮点增益系统，这时，仪器的局限性已不再成为保存地震波中一切信息的障碍。于是，才有实现恢复地震波真振幅的可能。与此同时，野外工作方法也发生了相应的变化，突出地表现在多次覆盖技术全面地取代了过去那种近炮点、短排列、简单连续追踪的惯用工作方法，使得用地震勘探方法解决地质任务的能力得以提高。从进一步提高数据采集能力着眼，我们可以预示，今后野外方法发展的趋势可能是新的面积勘探技术。另外，为了取得详细的地下资料，并对井的传送信息也是一种值得考虑的方法。

在数据处理方面，从七十年代以来，最明显的进展是对油气藏的直接探测。当地震勘探处在粗略地研究构造的几何形态的时候，我们得到的只能是构造“在哪里”？换句话说，只要弄

构造的形态、位置以及断裂分布就达到了我们的目的。这一目的现在基本上达到了。作为多次覆盖资料处理手段的水平迭加、偏移迭加技术，解决了反射段的空间归位问题，减少了构造几何形态的畸变。实现偏移的方法虽然很多，值得提出的是，波动方程法在未来的地震数据处理中将会占有重要的位置。随着地震数据处理方法的不断增多，地震勘探技术已经不仅仅能告诉你构造或圈闭“在哪里”，经过数字处理的地震记录上还有可能进一步告诉你构造或圈闭的内容“是什么”，即把地震波与岩性拉上了关系，这是今后地震数据处理的发展方向。“亮点”、“暗点”、“平点”技术，是地震勘探在直接找油找气方面的最新进展。

虽说地震直接找油找气已初见眉目，然而，搞清岩性对弹性波的速度、振幅和频率等地震参数的影响并非是件容易的事情。因此，在实验室里研究碳氢化合物对孔隙岩石的声学特性有什么样的影响显得十分必要。在这方面，已经取得了一定成绩。

在最近的五年中，速度分析方法发展很快。速度谱的应用，正在逐步推广。特别是数字计算机的广泛使用，为实现大量的速度计算和精确的速度分析提供了必要手段。目前，已知分析速度的方法不下60多种。比如利用计算机进行的自动速度分析和自适应速度分析技术便是当前速度分析技术的最新水平。无疑，这将有助于静校正、偏移技术的完善化。实质上，速度分析、静校正、偏移是一个问题的三个方面。

最近，用彩色显示地震参数给频谱分析的实际应用带来了希望。现在可以用代表特定子波频谱的色彩来显示变面积地震剖面。当地层中岩性变化时，可能产生对地震波高频成分吸收的差异，于是，在地震时间剖面上将会相应地出现颜色的更

4

异。当然波的异常与地质异常往往会相互混淆。这是我们在分析资料时应该注意的。

地震波参数的彩色显示不仅能表示频率的变化，只要稍加变动，还可以显示地震波的速度、极性乃至放大器的增益水平等等。总之，凡是能够反映地质界面岩性变化的地震参数都有待于我们今后不断地研究和利用。

近年来，海洋地震勘探发展很快。现在差不多所有的海洋地震队都采用非炸药震源工作。普遍得到使用的是汽枪和气体爆炸器。现代海上用的带有深度控制器的4800米长的电缆，可以自动改变记录脉冲的频谱，比1968年使用的等浮电缆更为优越。经过精心设计的小型数据处理设备已经搬到海上，这样可以缩短岸上计算中心的处理时间。海上勘探精度，随着卫星导航系统的应用使船位误差已降为原来的一半。相比之下，陆地地震勘探方法没有海洋勘探方法进展的那么明显。

本书将以多次覆盖技术的发展为起点，逐步引申到地震勘探如何直接找油找气，基本上概括了当前地震勘探技术发展的两个阶段。虽然，我们力求书的内容比较充实，逻辑比较严密，但是，由于水平所限，书中不足之处一定很多。殷切地希望广大读者及时提出宝贵意见。

目 录

修订版序

原序

第一章 地震波动	(1)
第一节 应力和应变	(2)
第二节 纵波	(7)
第三节 横波	(9)
第四节 面波	(11)
第五节 地震波的波形特征	(15)
第二章 地震波的激发	(24)
第一节 炸药震源	(24)
第二节 空气枪	(31)
第三章 反射波的传播特征	(37)
第一节 地震波的波前扩展	(37)
第二节 地震波的非弹性吸收	(42)
第三节 地震波的反射与透射	(46)
第四节 地震信号的动态范围	(50)
第四章 数字地震仪的仪器因素	(53)
第一节 信噪比(动态范围)	(53)
第二节 记录道数	(63)
第三节 采样率	(64)
第四节 前置放大器增益	(67)
第五节 数字地震仪的谐波畸变	(69)
第五章 地震数据采集中的参数设计	(72)
第一节 排列长度	(73)

第二节	道距	(76)
第三节	组合设计	(83)
第四节	其他参数	(101)
第六章	多次覆盖技术概述	(103)
第一节	多次覆盖的基本原理	(103)
第二节	多次覆盖的迭加效应	(110)
第三节	多次覆盖的观测系统	(126)
第四节	多次覆盖的共反射点分散	(130)
第七章	常规处理概述	(138)
第一节	基本处理流程	(138)
第二节	输入重排	(140)
第三节	反褶积	(141)
第四节	静校正	(141)
第五节	速度谱与动校正	(145)
第六节	预处理	(148)
第七节	共反射点迭加	(150)
第八节	修饰处理	(151)
第九节	频率滤波	(154)
第十节	二维滤波	(156)
第八章	速度分析	(161)
第一节	速度	(162)
第二节	速度信息的求取	(168)
第三节	速度精度的探讨	(192)
第四节	速度的显示方法	(201)
第五节	速度资料的解释	(205)
第九章	反褶积技术与子波处理	(208)
第一节	褶积模型与反褶积问题	(208)
第二节	决定性反褶积及其应用	(215)
第三节	统计性反褶积及其应用	(229)

第四节	最小二乘方反褶积	(232)
第五节	其他反褶积方法	(252)
第六节	如何得到一条好的反褶积和子波处理剖面	(262)
第十章	偏移方法分析	(267)
第一节	偏移原理	(271)
第二节	各种迭代反演法	(277)
第三节	各种偏移方法的特点与适用条件	(282)
第四节	反演的三个步骤	(293)
第五节	实际效果分析	(301)
第十一章	多次覆盖的地质效果	(316)
第一节	多次覆盖方法的应用情况	(316)
第二节	多次覆盖压制多次反射的效果	(326)
第三节	多次覆盖压制随机干扰的效果	(333)
第四节	多次覆盖在复杂构造带上的效果	(336)
第十二章	用反射波法确定地下地层的岩性	(341)
第一节	反射波的动力学特性	(342)
第二节	地震波的频率特征	(347)
第三节	反射波的振幅特征	(353)
第四节	反射波的运动学特征	(374)
第十三章	亮点技术	(389)
第一节	亮点的产生	(391)
第二节	亮点的特征	(395)
第三节	亮点的处理	(408)
第四节	亮点的解释	(418)
第十四章	平点技术	(421)
第一节	储集层的反射特征	(421)
第二节	流体接触面的反射强度	(427)
第三节	噪声强度与岩层反射系数	(433)
第四节	储集层厚度与地震频带	(435)

第五节	倾角鉴别处理	(438)
第六节	平点资料的显示	(443)
第七节	测网密度选择	(444)
第八节	平点勘探方法	(446)
第九节	平点勘探实例	(447)
第十五章	三维地震勘探	(456)
第一节	三维地震技术发展的背景	(456)
第二节	三维地震勘探的理论基础	(461)
第三节	三维观测系统	(464)
第四节	三维资料处理	(480)
第五节	三维资料显示	(494)
第六节	三维地震资料解释实例	(504)

第一章 地震波动

地震勘探利用的是人工激发的地震波。即用人工震源在井中或地面(或海水中)激发地震波,用检波器排列在地面(或井中、海水中)接收,然后研究地震波在地下介质中的传播特征,解决地质问题。

地震波之所以能在地下传播,是因为介质有弹性。当应力作用于介质时,其体积与形状发生变化(流体介质只有体积变化),应力消失后,介质又恢复到原来的状态,这种阻止介质因受力而形变,并使其恢复原状的性质就叫做介质的弹性。形变后能完全恢复原状的介质叫做完全弹性介质,或弹性介质。如果作用于弹性介质的应力突然解除,则介质的应变状态就以弹性波的形式向外传播,这就是地震波。

许多介质、包括我们的工作对象——各类岩石,在形变较小的情况下,都是弹性介质。不过,介质的弹性都是有限度的,即“弹性限度”,不同介质的弹性限度不同。受力较大,超过弹性限度时,会产生永久形变,如炮点附近的介质那样。在人工激发地震波的情况下,离开震源的某一距离之外,应力很小,形变是完全弹性的,此时地震波的传播取决于介质的弹性。介质的弹性由其弹性常数表示,弹性常数通过虎克定律把介质所受的应力与其应变联系在一起。因此,了解弹性波的特征,必须了解应力、应变与弹性常数。

第一节 应力和应变

一、应力

作用在单位面积上的力，叫做应力，如图1.1所示。若作用在面积元 ΔA 上的力为 ΔF ，则应力为

$$\vec{P} = \Delta \vec{F} / \Delta A$$

或

$$\vec{P} = d \vec{F} / dA$$

应力可分解为垂直于面积元 ΔA 的法向应力(或称压应力、膨胀应力)和与面积元 ΔA 平行的剪切应力。

通常用一个小长方体(体积元)来研究应力与应变,如图1.2所示。在直角坐标系(x, y, z)中,小长方体的六个面上各有三个应力分量,一个是垂直于该面的法向分量,两个是平行于该面的切向分量。例如,垂直于x轴的OABC面上,法向应力

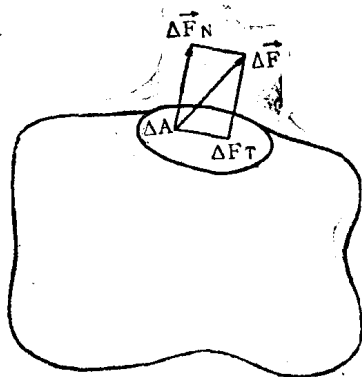


图1.1 应力

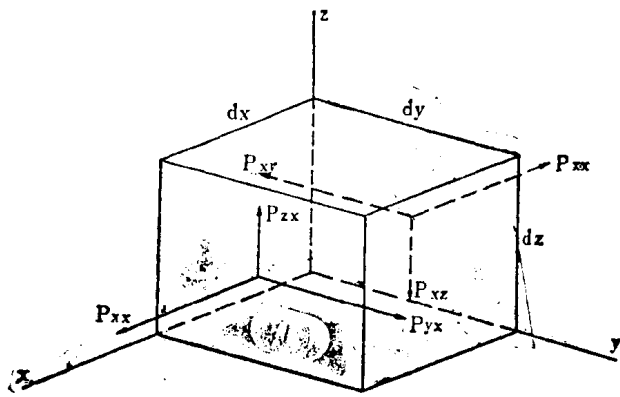


图1.2 元长方体上的应力

平行于 x 轴, 记为 P_{xx} , 切向应力分别平行于 y 轴和 z 轴, 记为 P_{xy} 和 P_{yz} 。

二、应变

弹性介质在应力作用下产生的形状和体积变化叫做应变。

如果在应力作用下元长方体各个顶点的位移不同, 我们就说发生了应变。质点的位移用矢量 U 表示, 它在直角坐标系三个轴向上的分量分别用 u_x 、 u_y 和 u_z 表示, 都是 (x, y, z) 的函数。按位移性质的不同, 又可把应变分为两种, 即压应变与切应变。

1. 压应变

这是一种纯体积变化, 或称为体积膨胀。如果元长方体的体积为 V_0 , 形变后体积为 V , 则相对体积变化、或体积膨胀 θ 为

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{V - V_0}{V} \\ &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}\end{aligned}$$

$\frac{\partial u_x}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial u_y}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial u_z}{\partial z}$ 分别表示 u 的三个分量的相对变化，即位移矢量 u 在 x 方向、 y 方向和 z 方向的简单伸长。

2. 切应变

这是一种纯形状变化，而无体积变化，反应为元长方体的角度变化。可以导出在 xy 、 yz 、 xz 坐标面内元长方体角度的总变化为

$$e_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \quad e_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}$$

$$e_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}$$

3. 弹性常数(应力与应变的关系)

在弹性限度之内，虎克定律通过弹性常数把应力与应变联系在一起。所谓虎克定律，即是说：应变正比于产生应变的力，其比例常数就是弹性常数。在非均匀各向异性介质中共有 21 个弹性常数，但在均匀各向同性介质中，弹性常数减少到两个，即拉梅常数 λ 和 μ 。如果用下述符号表示简单伸长(法向应变)。

$$e_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad e_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad e_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

则虎克定律的数学表达式为

$$P_{xx} = (\lambda + 2\mu) e_{xx} + \lambda e_{yy} + \lambda e_{zz}$$

$$P_{yy} = \lambda e_{xx} + (\lambda + 2\mu) e_{yy} + \lambda e_{zz}$$

$$P_{zz} = \lambda e_{xx} + \lambda e_{yy} + (\lambda + 2\mu) e_{zz}$$

$$P_{xy} = \mu e_{xy}$$

$$P_{yz} = \mu e_{yz}$$

$$P_{xz} = \mu e_{xz}$$

除拉梅常数以外，还有以下三个由拉梅常数派生出来的弹

性常数:

杨氏模量 E : 纯伸长时应力与应变之比。例如, 沿 x 方向的纯伸长, 可以认为是除法向应力 P_{xx} 不为零外, 其他应力均为零的情况, 此时沿 x 方向的纯伸长为 l_{xx} , 杨氏模量定义为

$$E = P_{xx}/e_{xx}$$

泊松比 σ : 上述情况下横向压缩与纵向伸长之比, 即

$$\sigma = -e_{yy}/e_{xx} \text{ 或 } \sigma = -e_{zz}/e_{xx}$$

负号表示横向形变与纵向形变符号相比, 即纵向伸长时, 横向是缩短, 加负号使 σ 为正值。

体积模量 K : 简单静水压力下应力与应变之比, 静水压力即应力三个法向分力相等时的应力, 即

$$P_{xx} = P_{yy} = P_{zz} = \Delta P$$

而

$$K = \Delta P/\theta$$

下列三个方程式表示五个弹性常数之间的关系

$$\left. \begin{aligned} K &= E/3(1-2\sigma) \\ \mu &= E/2(1+\sigma) \\ \lambda &= \sigma E/(1+\sigma)(1-2\sigma) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

泊松比的取值范围为 $0 \sim 0.5$, 岩石越坚硬致密, σ 越小, 越松软 σ 越大, 流体不产生形状变化, 只有体积变化, 因此 $\mu = 0$ 。

三、波动方程式

我们已经说过, 如果作用于弹性介质的应力突然解除, 则应变状态就成为弹性波在介质中传播, 其传播特征可以用波动方程式来描述。

联合应用上述虎克定律与牛顿第二定律(作用在物体上的

力等于物体的质量与其所获加速度之积)可以得到一组波动方程式。各类教科书上对波动方程式都有详尽的推导,此处我们直接写出最常用的平面波波动方程式、即一维波动方程式。

所谓一维波动,即只沿某一方向传播的波。例如沿 z 方向传播的波,其位移 u 与 x 、 y 无关,因此,在垂直于 z 轴的平面上(即 $z = \text{常数}$) u 处处相等,故也称平面波。对这种波有以下一组波动方程式

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = V_p^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \quad (1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= V_s^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= V_s^2 \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1 - \sigma)}{(1 - 2\sigma)(1 + \sigma)}} \quad (1-4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \sigma)}} \quad (1-5)$$

分别是纵波与横波在岩石中的传播速度。

ρ = 介质的密度

方程式(1-2)是纵波方程式,(1-3)是横波方程式。在介质中只要同时存在体积应变和切应变,运动就同时满足这两个方程式,即同时存在纵波与横波。这两种波都在介质内部传播,故称为体波。

在无限均匀各向同性介质中只有体波。但当介质在某一方面并非无限延伸,而是有界面的话,将会在界面附近产生面波。