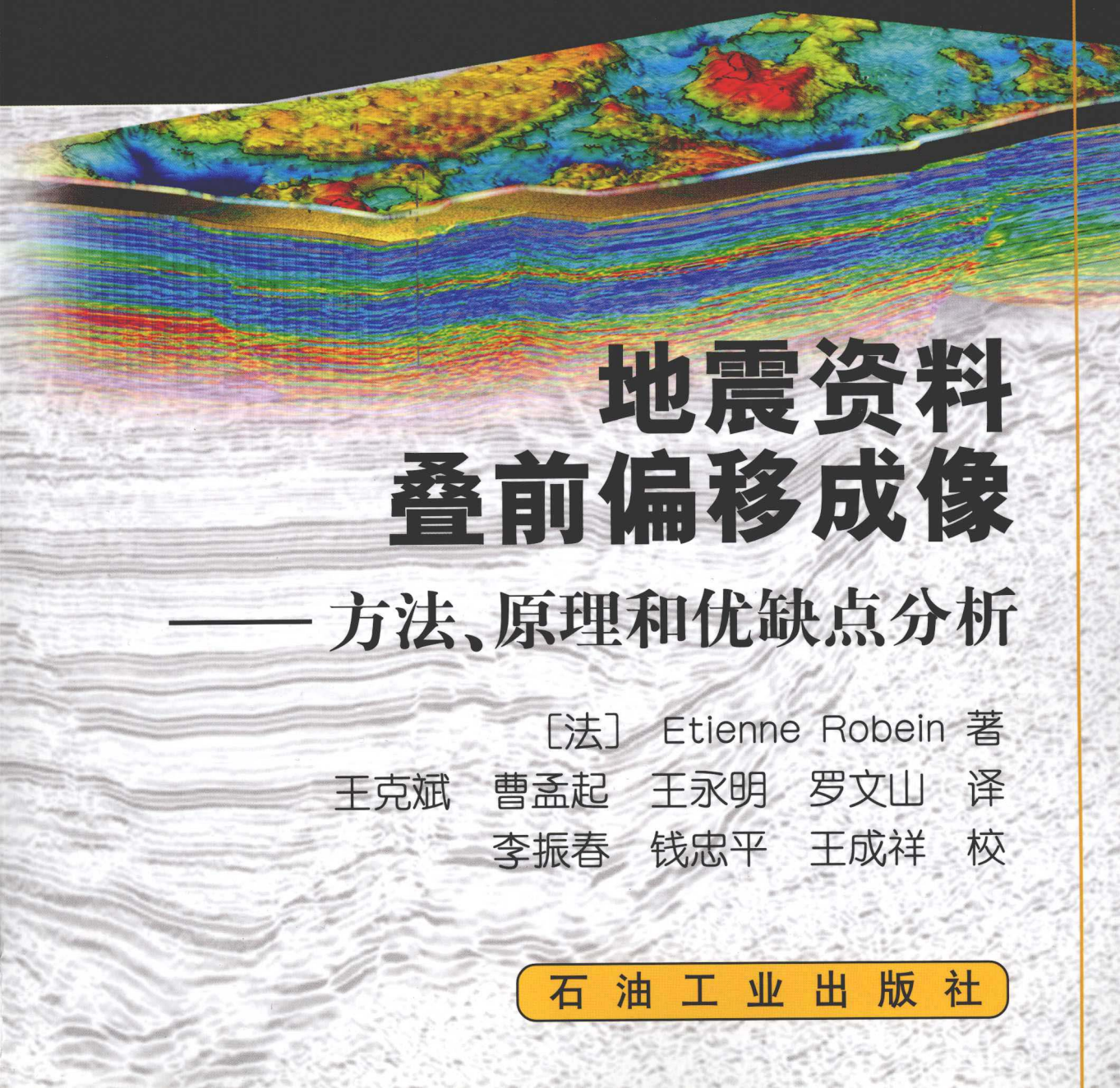


# Seismic Imaging

A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations



# 地震资料 叠前偏移成像

——方法、原理和优缺点分析

[法] Etienne Robein 著

王克斌 曹孟起 王永明 罗文山 译

李振春 钱忠平 王成祥 校

石油工业出版社

# 地震资料叠前偏移成像

## ——方法、原理和优缺点分析

[法] Etienne Robein 著

王克斌 曹孟起 王永明 罗文山 译

李振春 钱忠平 王成祥 校

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书深入浅出地介绍了目前地震资料处理中常用的克希霍夫叠前时间偏移 (PSTM)、克希霍夫叠前深度偏移 (PSDM), 以及各自的速度建模方法; 详细地讲解了高斯束叠前深度偏移、单程波动方程叠前深度偏移、双程波动方程叠前深度偏移 (RTM) 的基本原理和实现过程; 简要地阐述了波动方程延拓法叠前深度偏移速度分析及目前最前沿的全波形反演速度建模技术 (FWI); 同时, 用实例分析和说明了这些偏移成像技术各自的优缺点, 强调了偏移策略选择和多学科一体化结合在做好偏移成像项目中的重要性。

本书内容全面、通俗易懂, 图文并茂, 是一本实用性强的教材。本书还可作为从事油气地球物理勘探专业的技术人员、大学本科生及研究生的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

地震资料叠前偏移成像——方法、原理和优缺点分析/[法]罗宾(Robein, E.)著,  
王克斌等译. 北京: 石油工业出版社, 2012. 5  
书名原文: Seismic Imaging——A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations  
ISBN 978-7-5021-8953-2

I . 地…

II . ①罗… ②王…

III . 地震数据 - 数据处理

IV . P315.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 038262 号

Translation from the English language edition: "Seismic Imaging——A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations" by Etienne Robein. EAGE holds the worldwide copyright of the Work.

Copyright © 2010 EAGE Publications BV, All Rights Reserved.

The work in English is available for purchase from EAGE.

本书经 EAGE Publications BV 授权翻译出版, 中文版版权归石油工业出版社所有, 侵权必究。著作权合同登记号: 图字 01-2012-0989

---

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: [www.petropub.com.cn](http://www.petropub.com.cn)

编辑部: (010) 64523533 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13.25

字数: 400 千字

---

定价: 128.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

# 译者的话

由 Etienne Robein 所著的《地震资料叠前偏移成像——方法、原理和优缺点分析》(Seismic Imaging——A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations) 一书是欧洲地球科学家及工程师协会 (EAGE) 组织出版的教育系列的第四本培训教材。2010 年出版后, Etienne Robein 先生在多个国家巡讲, 深受国内外地球物理工作者的欢迎。

本书深入浅出地介绍了目前地震资料处理中常用的克希霍夫叠前时间偏移 (PSTM)、克希霍夫叠前深度偏移 (PSDM), 以及各自的速度建模方法; 详细地讲解了高斯束叠前深度偏移、单程波动方程叠前深度偏移、双程波动方程叠前深度偏移 (RTM) 的基本原理和实现过程; 简要地阐述了波动方程延拓法叠前深度偏移速度分析及目前最前沿的全波形反演速度建模技术 (FWI); 同时, 用实例分析和说明了这些偏移成像技术各自的优缺点, 强调了偏移策略选择和多学科一体化结合在做好偏移成像项目中的重要性。

叠前偏移成像技术涉及复杂的数学和地球物理知识, 但本书从叠前偏移成像技术的基本原理和概念入手, 正文公式不是很多, 更多地通过简明扼要的图示让读者非常直观地理解各种复杂叠前偏移技术的基本原理和实现流程, 为广大从事生产应用的地震资料处理技术人员更好地学习、掌握和应用这些先进的叠前偏移成像技术提供了一本非常通俗易懂、内容全面、清楚实用的教材。本书还可作为从事油气地球物理勘探专业的技术人员、大学本科生及研究生的参考书。

本书由中国石油天然气集团公司东方地球物理勘探有限责任公司研究院常务副院长兼资料处理中心主任王克斌组织翻译。翻译与审校历经一年半的时间完成, 参加翻译和审校的同志做了大量细致的工作。绪言、第 1 章、第 2 章、第 8 章由王克斌博士翻译, 钱忠平博士审稿; 第 3 章、第 4 章由王永明翻译, 王成祥博士审校; 第 5 章由曹孟起博士翻译, 王成祥博士审校; 第 6 章由罗文山翻译, 李振春教授审校; 第 7 章由曹孟起博士翻译, 李振春教授审校; 王克斌博士对全书进行了校对统稿。

该书的翻译出版得到了中国石油天然气集团公司东方地球物理勘探有限责任公司研究院王学军院长的全力支持，在此表示衷心的感谢！

中国石油天然气集团公司东方地球物理勘探有限责任公司研究院处理中心彭章礼、中国石油大学（北京）硕士研究生马子涵等同志做了许多文字和插图校对工作，付勤同志帮助打印多章中文译稿，在此一并表示感谢！

翻译的过程也是我们自己重新学习的过程，每一个参加这项工作的同志都从中受益匪浅。虽然翻译过程中已尽可能地将专业术语统一，并尽可能地将原作者的思想表达清楚，但由于译者专业知识和经验所限，译文仍可能存在许多不妥之处，欢迎读者批评指正！

## 目 录

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 绪言 .....                              | 001 |
| 1 波的传播：几点提示 .....                     | 006 |
| 1.1 P 波传播 .....                       | 006 |
| 1.2 用水中检波器和陆地检波器来记录弹性波 .....          | 007 |
| 1.3 地震振幅 .....                        | 007 |
| 1.4 波动方程和传播速度 .....                   | 008 |
| 1.5 波动方程 .....                        | 008 |
| 1.6 传播速度 .....                        | 009 |
| 1.7 波传播的模拟——数值模型 .....                | 009 |
| 1.8 波前与射线 .....                       | 012 |
| 1.9 地层是各向异性的 .....                    | 013 |
| 1.10 各向异性介质中的波前、相位角、群倾角、相速度和群速度 ..... | 014 |
| 1.11 速度的解析参数化 .....                   | 016 |
| 1.12 速度各向异性的参数化 .....                 | 017 |
| 1.13 各向异性介质中的 Snell 定律和射线 .....       | 018 |
| 1.14 射线、波前和地震记录关系 .....               | 019 |
| 2 基于射线和克希霍夫求和的偏移原理 .....              | 021 |
| 2.1 地下的反射体和绕射体 .....                  | 021 |
| 2.2 反射模型 .....                        | 022 |
| 2.3 射线偏移 .....                        | 023 |
| 2.4 绕射模型 .....                        | 024 |
| 2.5 克希霍夫求和概念 .....                    | 025 |
| 2.6 在克希霍夫求和偏移中对反射和绕射的一些认识 .....       | 026 |
| 2.7 克希霍夫求和偏移的实施 .....                 | 028 |
| 3 叠前时间偏移：原理与速度分析 .....                | 030 |
| 3.1 垂向时间的定义 .....                     | 030 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.2      | 垂向时间域的克希霍夫偏移 .....                                 | 031        |
| 3.3      | 共炮检距域 .....  | 032        |
| 3.4      | 共炮检距域的绕射波和克希霍夫积分求和 .....                           | 033        |
| 3.5      | 多偏移距成像, 共成像道集和叠加 .....                             | 034        |
| 3.6      | 叠前时间偏移绕射曲线推导: 射线追踪方法 .....                         | 037        |
| 3.7      | 叠前时间偏移绕射曲线推导: 解析方法 .....                           | 040        |
| 3.8      | 叠前时间偏移速度分析 .....                                   | 044        |
| 3.9      | RMO 原理 .....                                       | 050        |
| 3.10     | 叠前时间偏移的优点和局限性 .....                                | 051        |
| <b>4</b> | <b>基于射线的克希霍夫偏移及层析成像 .....</b>                      | <b>056</b> |
| 4.1      | 共炮检距域克希霍夫叠前深度偏移原理 .....                            | 057        |
| 4.2      | 面向成像域及面向数据域的实现方法 .....                             | 059        |
| 4.3      | 成像点道集的层析成像反演 .....                                 | 059        |
| 4.4      | 表示各向异性速度场的不同模型 .....                               | 061        |
| 4.5      | 线性化层析 .....  | 062        |
| 4.6      | CIG 拉平及剩余时差分析 .....                                | 064        |
| 4.7      | 基于层状和网格的层析成像 .....                                 | 067        |
| 4.8      | 速度建模工作站 .....                                      | 072        |
| 4.9      | 约束、井标定和规则化 .....                                   | 072        |
| 4.10     | 线性和非线性层析成像 .....                                   | 076        |
| 4.11     | 三维偏移算子 .....                                       | 077        |
| 4.12     | 从反射层的立场来看克希霍夫偏移: 反射角和与反射相关的 CIG 道集 .....           | 079        |
| 4.13     | 绕射成像 .....   | 082        |
| <b>5</b> | <b>射线束偏移 .....</b>                                 | <b>084</b> |
| 5.1      | 炮集反射段的炮检距—射线偏移概念 .....                             | 084        |
| 5.2      | 在共炮检距域的炮检距—射线偏移 .....                              | 086        |
| 5.3      | 共中心点道集域所拾取反射段的炮检距—射线偏移 .....                       | 088        |
| 5.4      | 三维炮检距射线偏移中的问题 .....                                | 088        |
| 5.5      | 偏移质量指示因子 .....                                     | 090        |
| 5.6      | $\tau$ - $p$ 变换 .....                              | 090        |
| 5.7      | Gaussian 射线束偏移原理 .....                             | 092        |
| 5.8      | GBM 与 Kirchhoff 偏移的关系: 一些评论 .....                  | 095        |
| 5.9      | GBM 关键参数 .....                                     | 095        |
| 5.10     | 可控的、射线束控制的、基于子波的、基于子倾角的射线束偏移<br>和其他“快速”射线束偏移 ..... | 097        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.11     | “可控的”射线束偏移 .....                                   | 098        |
| 5.12     | 基于子波的射线束偏移 .....                                   | 100        |
| 5.13     | 共炮检距域基于子倾角的偏移 .....                                | 101        |
| 5.14     | 射线束偏移中的同相轴选择 .....                                 | 103        |
| 5.15     | 炮检距域与角度域成像道集和射线束偏移速度分析 .....                       | 105        |
| 5.16     | 射线束偏移的优点与缺点 .....                                  | 106        |
| <b>6</b> | <b>波场延拓偏移 .....</b>                                | <b>108</b> |
| 6.1      | 成像原理 .....   | 108        |
| 6.2      | 成像条件 .....   | 110        |
| 6.3      | 深度与时间延拓 .....                                      | 111        |
| 6.4      | 单程波炮点偏移原理 .....                                    | 113        |
| 6.5      | 处理全部炮 .....  | 117        |
| 6.6      | 傅里叶 + 空间混合域的波场延拓 .....                             | 119        |
| 6.7      | 延迟与编码炮偏移 .....                                     | 122        |
| 6.8      | 观测排列延拓的概念 .....                                    | 125        |
| 6.9      | 逆时偏移的原理及工作流程 .....                                 | 128        |
| 6.10     | 在 RTM 中处理所有的单炮 .....                               | 129        |
| 6.11     | 用有限差分方法进行时间延拓 .....                                | 130        |
| 6.12     | RTM 噪声 .....                                       | 133        |
| 6.13     | 为什么 RTM 是海量计算处理及其可能的优化方法 .....                     | 135        |
| 6.14     | 摘要重述: RTM 的优点和缺点 .....                             | 139        |
| <b>7</b> | <b>基于波场延拓的偏移速度分析和基于反演的技术 .....</b>                 | <b>141</b> |
| 7.1      | 地下炮检距 CIG 的概念 .....                                | 141        |
| 7.2      | 多炮的地下炮检距共成像道集 (SO-CIG)<br>和散射角共成像道集 (SA-CIG) ..... | 144        |
| 7.3      | RTM 后的 SO-CIG 和 SA-CIG .....                       | 146        |
| 7.4      | 速度模型不正确情况下的 SO-CIG 和 SA-CIG .....                  | 146        |
| 7.5      | 用地下炮检距 CIG 进行偏移速度分析 .....                          | 147        |
| 7.6      | 三维采集对 SO-CIG 的影响 .....                             | 151        |
| 7.7      | 全波形反演 (FWI) 原理 .....                               | 155        |
| 7.8      | FWI 中的正演问题 .....                                   | 157        |
| 7.9      | 频率域中 FWI 的工作流程 .....                               | 158        |
| 7.10     | 拉普拉斯—傅里叶域和初始模型 .....                               | 164        |
| 7.11     | 平面波和编码炮方法 .....                                    | 166        |
| 7.12     | Valhall 三维示例 .....                                 | 167        |



|      |   |     |
|------|---|-----|
| 8    | 实例、讨论与结论.....                           | 169 |
| 8.1  | 对偏移和全波形反演分辨率的一些认识.....                  | 169 |
| 8.2  | 偏移、最小平方偏移和全波形反演.....                    | 171 |
| 8.3  | 非常规地震成像.....                            | 172 |
| 8.4  | 双聚焦.....                                | 173 |
| 8.5  | CRS 叠加与多聚焦.....                         | 174 |
| 8.6  | 射线追踪作为成像时“地球物理解释”的工具.....               | 176 |
| 8.7  | 用棱镜波成像.....                             | 179 |
| 8.8  | 各向异性模型：VTI 或 STI.....                   | 180 |
| 8.9  | 各向异性参数：如何得到 $\epsilon$ 和 $\delta$ ..... | 182 |
| 8.10 | 方位速度各向异性.....                           | 185 |
| 8.11 | 是否有一个最佳的成像算法？.....                      | 187 |
| 8.12 | 成像是一项团队工作，并且地质认识对其有着特别的重要性.....         | 189 |
| 8.13 | 结论.....                                 | 190 |
|      | 致谢.....                                 | 191 |
|      | 参考文献.....                               | 192 |

# 绪言

寻找新的资源意味着不仅要最大限度地增加已发现油气藏的产量，而且要在日益复杂的地区寻找新的油气田。在此过程中，地震成像作为一个工具正发挥着越来越重要的作用。

在具有一定处理周期的复杂数据处理流程中，地震成像是最后一个环节，它的目的是为地球科学家提供适合于解释的地球内部清晰图像。

这本书全面总结了目前在油气工业中最常用的叠前地震成像方法，它主要包括两类技术：时间域成像、深度域成像。两类方法都需要估计地下任何给定点的地震波传播速度，但对准确性具有不同的要求。时间域成像和速度分析尽管几乎自然地结合在一起，但还是以牺牲成像质量为代价，只有深度域成像才要求速度模型的准确构建。地震采集技术、成像技术、高性能计算机的最新进展使我们能够正确地认识更为复杂的地下地质模型，因此也就可以对以前看不见的复杂构造进行成像。

这本书简要地说明了每类方法中不同技术的原理，同时也指出了它们各自的优缺点。本书还附带讨论了采集和成像技术、解释和成像技术之间的关系。

然而，本书不想去阐述或简要触及数据预处理相关的课题，如信号处理、多次波衰减、静校正等，对这些内容，读者可查阅经典参考书（Yilmaz, 1987, 2001），并且多次波衰减已全包括在以前 EAGE 教育漫谈的有关课程中（Verschuur, 2006）。类似地，其他一些先进的处理和成像技术，如转换波成像、多次反射成像、井中地震、各种微地震技术在本书中只是简要提及。

## 什么是确切的反射波地震成像

反射地震方法的基本原理是：激发弹性波进入地球内部，再让弹性波在地下沿各个方向传播，这样就向地下发送了一个“地震信号”。

当弹性波在地球内部传播的过程中遇到非均匀介质时，便会产生折射波、反射波、转换波，反射能量传回地表后最终被地表上的特殊检波器接收并收录下来（如图 0.1 所示）。

地震处理和成像的目的是从得到的地震记录中恢复这些非均质体的图像，通过这些图像刻画地下目标区的主要地质特征。这些“地质非均质体”通常在地下具有一定的横向连续性，这在地震术语中称之为“层”，或更常称为“层分界面”或“反射界面”，按照物理地震学的观点，也叫“绕射点”。

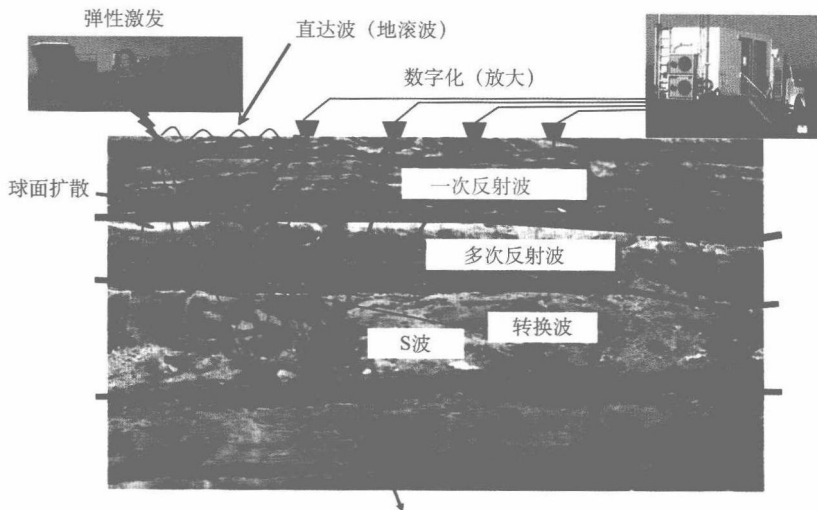


图 0.1 地震试验

产生各种类型的波，其中一些波在地面被接收

更准确地说，折射出现在速度发生变化的地方（下面将进一步讨论该术语），反射发生在“声波阻抗”出现变化的地方。声波阻抗是任何介质的一个弹性特性，它是传播速度和密度的乘积。成像的关键点是反射波振幅正比于入射波振幅，这个比例系数称为反射系数。在各向同性情况下，它是非均质体（通常是一个地质层）上下三个弹性参数与入射角的函数（如图 0.2 所示）。在后面的讨论中多次提到的“成像条件”就是用于计算反射系数的。因此，我们把地下每个点“弹性反射率”的图像称为地震成像剖面。

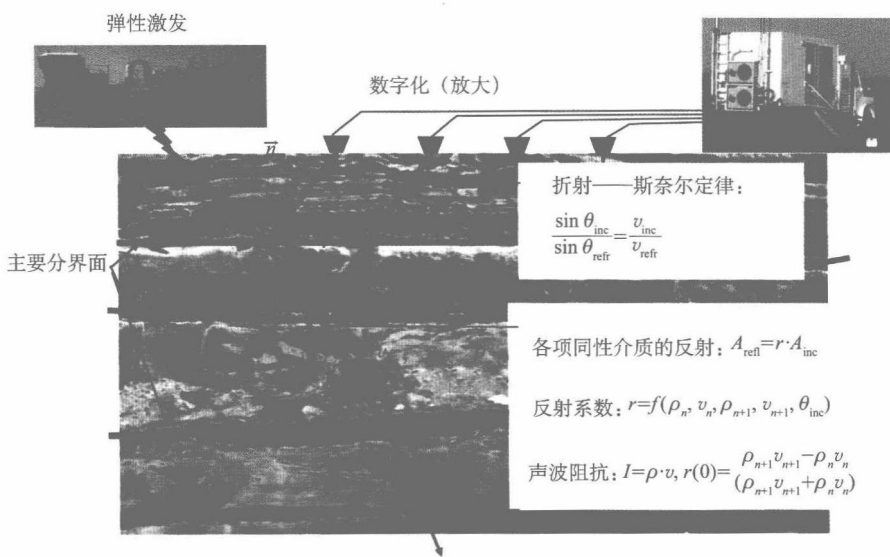


图 0.2 地震中涉及的两种主要现象：反射和折射

这里还需要更准确地阐述一下这个问题。请注意地层分界面上出现的另一个现象：部分入射能量从一种类型波转换成另一种类型波，如图 0.1 所示，地震反射成像涉及的波主要是“P 波”（见下文）。在地层弹性分界面上，部分波能量被转换成“横波”，转换量的大小依赖于弹性波入射到地下非均质体的角度，这个角度范围从  $0^\circ$  至  $90^\circ$ ，被称为入射角，P 波反射系数与入射角有密切关系。要得到对应于零入射角反射系数的基本图像，经常被称为“垂直入射”，但是反射系数随入射角函数变化的方式对地球物理学家来说也非常重要，这是因为它提供了更多地球弹性特性的信息，这种信息在解释过程中极可能与地质现象相关联，而反射系数如何随入射角函数变化的分析和显示则是地震成像的另一个产品，称为“振幅随入射角变化分析 (AVA)”。

在这一点上，我们也已注意到发送到地下的弹性信号是有频带宽度限制的，即它并不包括所有频率并且它具一定时间长度。想象有两个（垂向）相邻很近的地层，其对应的反射波以远短于子波长度的时间间隔先后到达地表：这两个“反射波”就混合在一起，在地震剖面上就分不出两个清楚的地层了，也就是说地震信号的频带限制了地震剖面的分辨率，因此也称作地球弹性反射系数的“频带限制版本”。注意，地震信号的频带限制主要来自两个方面：一方面是向地下发送极低频信号的内在物理限制，另一方面是当波向地下传播时，波的高频成分会“自然”衰减。

为了产生地下图像，我们需要用某种方法来求取波在地球内部传播的速度场，该问题将在本书广泛讨论，这个速度场就是从处理和成像技术中求得的第 (3) 类信息。

因此，从 P 波地震成像中，我们期望得到的结果是：

- (1) 一张地震剖面，它描述的是垂直入射情况下地下非均匀介质频带限制版的弹性反射系数；
- (2) 反映入射角随反射系数变化的信息；
- (3) 地球内部 P 波传播速度场的信息。

从图 0.2 中的定义中可知，反射系数是声波阻抗对数的导数。为了重建在每个道位置上的声波阻抗曲线，从数学意义上说，它对产生成像的反射系数序列进行积分从而起到“层序反演”的作用（不要与后面提到的其他类型的反演混淆）。然而因为地震上只能给我们提供频带限制版的反射系数，所以它必须与其他类型的信息相结合，如速度信息。除了成像过程本身得到的速度场外，还应使用钻井速度信息，如果要构建“真”波阻抗，还必须使用其他先验信息，这方面内容已不在本书讨论范围之列。

## 透射、衰减、折射和其他一次反射波

我们说当弹性波遇到地下非均匀介质时，由反射系数控制的部分能量产生反射。由于在大部分情况下，反射系数远小于 1（反射系数 0.01 可能被认为是强反射），波的另外部分将继续向地球深部传播，再遇到其他非均质体，再产生反射，把部分剩余能量传回地表……这就意味着我们可以连续记录越来越深地层的“一次反射波”。然而，这不是无限可循环的，当波的振幅衰减达到环境噪声能量以下临界点时，反射波不能被记录了。对此至少有三个原因：

- (1) 由于在地层分界面，入射能量的一部分既被反射又产生转换波，只有部分能量继续

向下传播，透射与入射振幅之比被称为“透射系数”，它总小于1；

(2) 球面扩散，这个术语我们在后面将展开讲解；

(3) 衰减，这是个包括能量非弹性损失的概念（摩擦、岩石和流体的互相作用等）。

最后，当波传播通过非均匀介质体时，另外一种现象出现了，即光学上著名的折射现象：入射波传播方向沿着地层分界面方向被改变，它可以用斯奈尔定律来定量计算。所有这些不同的因素都是重要的，而且需要在成像过程中以某种方式进行补偿，在本书中将不断提到。

## 多次反射波

地层弹性参数的非均质性不仅可以从下行波观察到，也会反映在传播返回地表的上行反射波上。因此反射、折射、透射现象同样会发生在上行反射波传播过程中，这意味着上行反射波的部分能量会以更低的振幅再次向下传播，它们被称为“多次反射波”或“多次散射波”。由于它们并不遵守成像中所用的传播规则，因此，我们认为它们是不需要的波。这种波在地震剖面上以误导作用而存在，在经典成像技术中，处理多次波的通常方式是在处理阶段努力从地震记录中消除它们。然而，多次反射波还带有将在后面讲到的地下反射系数场的信息，因此在成像中一个新的重要课题是：如何直接利用它而不是预先消除它？在第6章中我们将讨论这个问题。

## 处理和成像

本书主要涉及地震成像方面的内容，它又不同于地震处理，可以把地震处理流程中涉及构建地震剖面的所有步骤称为“成像”，我们将研究两种非常不同的流程（如图0.3所示）：

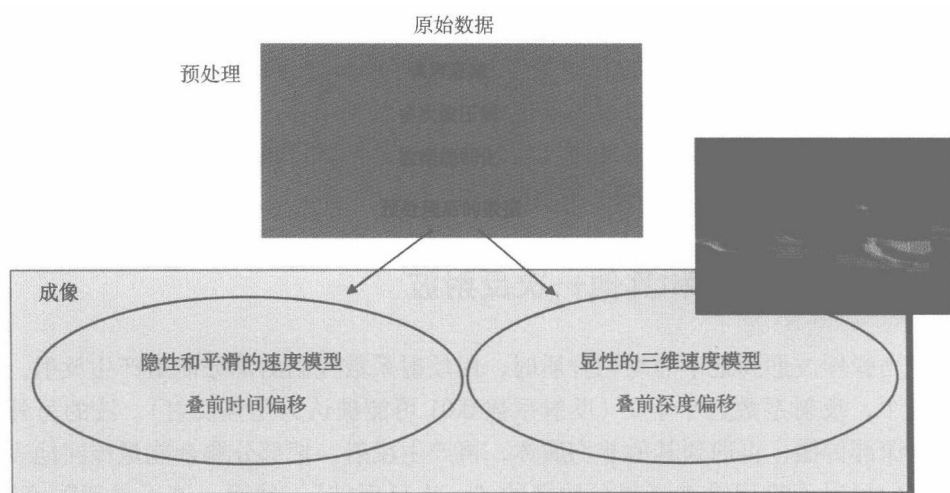


图 0.3 地震处理与成像

本书主要涉及的是地震成像内容

(1) 时间域成像，也称为叠前时间偏移，以及与它对应的“速度分析”。

(2) 深度域成像，有许多不同的“叠前深度偏移”、“全波形反演”、“深度模型建立”方法。

这就意味着本书不会深入地讨论有关偏移前数据准备即数据预处理的内容，数据预处理研究的是炮点信号反褶积、噪声消除、静校正或多次波消除的内容。然而，由于在现代地震勘探中，采集、处理、成像、解释流程中的所有步骤与过去相比都更加相互关联，我们应该明白为何采集参数设计离不开处理流程的选择，还将讨论解释与成像是如何相互作用的。

## 地震成像的目的

从上面的叙述中我们可以得出结论，地震处理和成像的目的是把地表上记录的反射波归位到地下的正确位置上去，其波的“振幅”大小与局部反射点的反射系数呈正相关关系。在时间域成像中，正如我们看到的，剖面是以“垂直时间”为垂直轴的。在深度域成像中，我们的目标是把反射系数直接归位到它的真实深度和位置上去。

在勘探阶段，地震成像主要用于构造解释、岩石体积估算或井位优化布署。

在油田开发阶段，更需要利用地震信息去进行油藏描述：包括油气藏边界检测、精细构造解释、精确的断层定位、储量计算修改、井轨迹优化布署，甚至通过地震属性确定油藏特征（AVA、声波或弹性波阻抗刻画孔隙变化等），这是地震油藏描述的内容。

# 1 波的传播：几点提示

在绪言中，我们了解到地震成像与弹性波传播密切相关。在本章中，我们将简要地介绍有关地震波如何传播的重要概念、波动方程、波前和射线理论，还要重点讲述 P 波速度和速度各向异性。

## 1.1 P 波传播

什么是弹性波？为什么它们能“传播”进入地下？

从一个地震震源在时间上的激发时刻和空间上的激发点（位于可控震源车震动平面下方的土壤、环绕由空气枪产生水泡的水域、炸药震源产生的井壁等）开始，在激发点附近介质的质点产生位移从而导致局部压力场的动量不平衡。被地震震源推动的质点由于不能自由移动而产生压缩，结果导致对其周围粒子产生压力。然后，这种质点继续产生位移并承受其本身压力，在它们再次停止运动以前把推力传递给其相邻的质点。接下来，当可控震源平台上升或在静水压力下气泡收缩时，与震源接触的质点以相反方向经历第二次运动。如此，地震震源在相邻的质点中引发一次振荡或扰动，称为近场信号。

这种由震源产生的压力场中质点的运动和变化将以这种方式传播到地下，甚至在震源震动本身已经停止发射信号以后传播仍可进行。在全弹性介质的理想情况下，这种“弹性波”将无限传播。

这种现象如图 1.1 所示，图 1.1a 表示在初始平衡位置下的地下状态。在  $t=0$  时刻，可控震源发射了一个信号，这个信号  $s(t)$  在可控震源平板处于平衡状态下可以用时间函数来描述（图 1.1c）。平板直接作用于与其紧邻的地下质点，被推动的质点又依次作用于其相邻的质点；以这种弹性方式传播的质点运动在介质内部产生了压力变化场，在任何给定时刻  $t$ ，地下状态可以用下列两个变量之一来表示：

- (1) 相对于地下原始平衡状态下的位移  $\eta$ ；
- (2) 相对于平衡压力的压力场变化  $p$ 。

用质点运动或者用局部压力场变化来表示的这种振动状态作为时间的函数被称为波场，这里是一维的。当涉及压力时，它可用  $p(z, t)$  来表示，如果是质点运动可用  $n(z, t)$  来表示。图 1.1b 以波场快照的形式来展示上述运动状态，图中用灰度深浅来描述特定的时刻  $t_1$  地下每个点上的压力状态。图 1.1 中，变量  $\eta$  和  $p$  在波场快照时刻  $t_1$  是深度的函数。

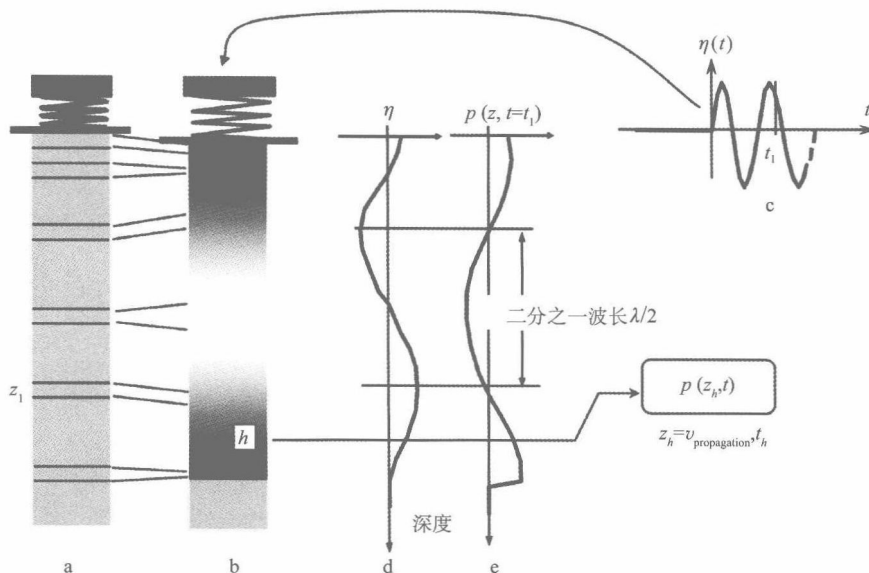


图 1.1 质点速度、压力和波的传播

a—初始平衡；b— $t_1$ 时刻“波场快照”；c—震源信号；d—质点位移；e— $t_1$ 时刻质点压力（来自 Robein, 2003, 15 页）

## 1.2 用水中检波器和陆地检波器来记录弹性波

在海洋地震勘探中，压力差  $p$  是用水中检波器来记录的，而在陆上或井中地震试验时，一般用陆上检波器或加速度检波器。这些检波器得到一个正比于位移速度或质点速度  $v$ （位移  $\eta$  的时间导数或它们的加速度）的电信号。

例如，在图 1.1b 中在深度  $z_h$  点上定位于  $h$  的一个水中检波器在  $t_1$  时刻产生一个正比于压力场  $p(z_h, t_1)$  的电信号，即在时间段  $t$  的可变信号为  $p(z_h, t)$ 。同样，在  $h$  位置的陆地检波器给出了  $t_1$  时刻正比于质点速度  $v$  的电流，它等于在这个深度上质点位移  $\eta$  随时间的变化率。

然而，由于压力是一个标量，而位移和质点速度是有方向的，因此它们是矢量也称“极化”，这就意味着一个单独的陆地检波器一次只能接收到质点速度的某个特殊分量。

(1) 在常规陆地地震勘探中，陆地检波器能接收到运动的垂向分量。

(2) 与此相反，在海底电缆或井中地震中，地震的目的是记录整个运动的矢量场，因此要用到多分量检波器。对陆上来说，它是由三个方向上互相垂直的陆地检波器组成，而对海上来说是用三个方向上互相垂直的水中检波器组成。三分量检波器使得我们能够记录到质点运动（极化）的全矢量场。

## 1.3 地震振幅

来自于陆地检波器或水上检波器的电流值在收录到磁带之前首先要以通常 2ms 的采样间隔进行数字化。理论上，在磁带上记录的振幅值正比于质点速度或压力变化。然而，正常情



况下，比例系数被舍弃，记录在带上的地震“振幅”仅仅是相对的。

## 1.4 波动方程和传播速度

岩石是具有弹性的，尽管这点很难理解，但却是波为什么能够在地下传播的原因。如果地球不是弹性的，可控震源车下方是完全无限刚性介质，地下将整体运动。幸好地下是弹性体，使任何由震源车引起的运动没有在瞬间传播结束。

## 1.5 波动方程

波的弹性传播能用数学来表示。

这个概念可用图 1.2 来说明，图中表示的是一个位于深度  $z$  和时刻  $t$  的质点，分析作用于这个质点上的力，也叫弹性和惯性，物理学家建立了“弹性波动方程”，这里最简单地假设密度是常数的一维（1D）声波方程。

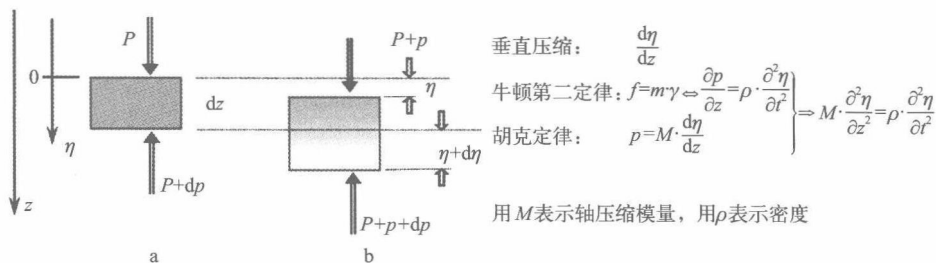


图 1.2 假设密度是常数的一维（1D）声波方程

当水平弹性平面波撞击到一个质点时，这个点处于压力之下。牛顿定律和胡克定律写出一个对变量位移和时间的差分方程，该方程控制了作为时间函数的质点运动。a—平衡时的质点；b—受力下的质点（来自 Robein, 2003, 17 页）

岩石的弹性意味着当我们施加了一个力（应力）到岩石时，它会变形（应变），胡克定律就是应用到一个弹性材料上的应力和由之而产生应变的一组经验性的线性关系式。

在一维情况下，这个特殊的比例系数被称为轴模量，用  $M$  表示，它描述了波在地下传播时的弹性特征。惯性遵照牛顿第二定律，它与物体的质量有关。这是为什么质点的密度被用于该方程的原因。

把两个定律结合在一起最终就得到了描述弹性运动的微分方程：弹性波动方程或简单地叫波动方程。该方程描述了质点对深度位移的导数（波是如何在空间中运动的）、质点位移对时间的导数（波是如何随时间推移而演化的）、介质的局部密度  $\rho$ （假设不随  $z$  而变化）和各局部弹性特性的关系，一维声波方程为

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} = \frac{\rho}{M} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

我们将用它来简单地表示波动方程和传播现象之间的联系。