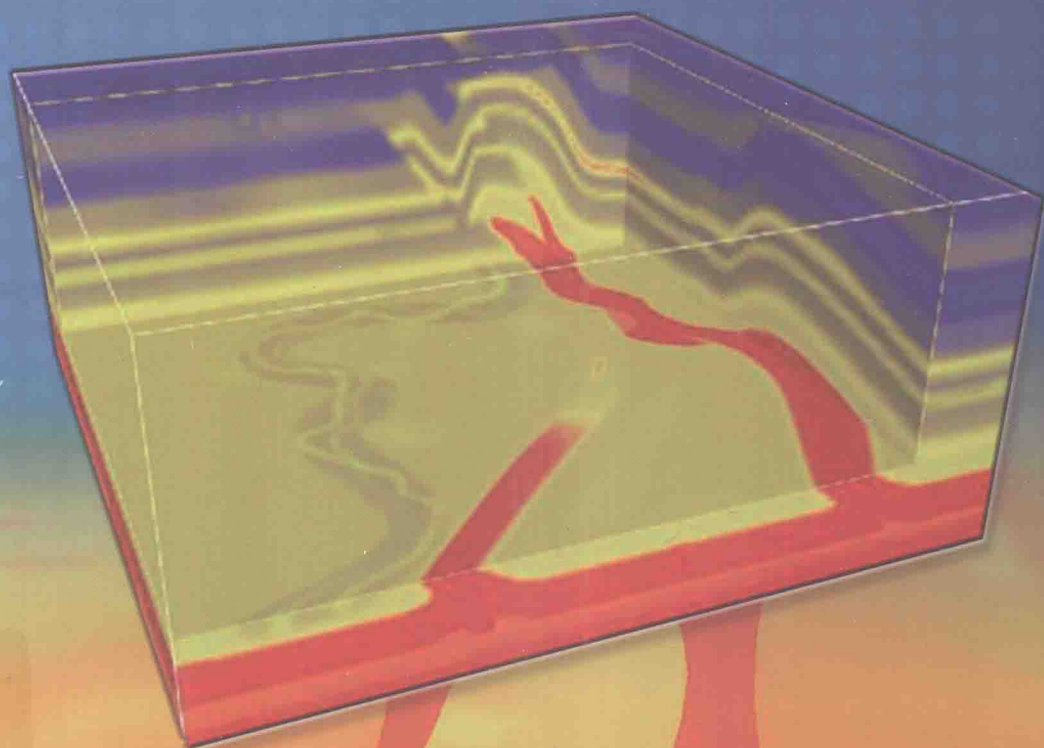


叠前深度偏移 速度建模技术入门

[英] Ian F. Jones 著

王克斌 曹孟超 王永明
赵玲芝 岳玉波 刘涛然 译



石油工业出版社

叠前深度偏移速度建模技术入门

[英] Ian F. Jones 著

王克斌 曹孟起 王永明
赵玲芝 岳玉波 刘涛然 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对速度建模技术发展历史进行了回顾,论述了速度建模从一维的垂向更新方法到真正的三维层析更新的变化过程,是一本有关叠前深度偏移速度建模技术的入门参考书。内容包括:偏移成像的发展、精细速度模型与偏移、速度建模的精度、速度模型的表示与拾取、反演与层析成像、各向异性层析成像、速度建模技术演变历程、层析迭代的更新、近地表和近海底环境对速度建模的影响、速度建模技术的未来。

本书实用性强,可作为地球物理勘探专业的技术人员、大学本科生及研究生的学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

叠前深度偏移速度建模技术入门/[英]伊恩·F. 琼斯(Ian F. Jones)著;王克斌等译. —北京:石油工业出版社,2016.9

书名原文:An Introduction to: Velocity Model Building

ISBN 978-7-5183-1459-1

I. 叠…

II. ①伊… ②王…

III. 叠前偏移-深度偏移-建立模型

IV. ①P631.4 ②P315.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 215499 号

An Introduction to: Velocity Model Building

Ian F. Jones

Copyright © 2010 EAGE Publications bv, All Rights Reserved.

EAGE holds the worldwide copyright of the Work.

The Chinese translation edition is published by arrangement with EAGE.

The work is available in English for purchase from the EAGE bookshop.

本书经 EAGE 授权翻译出版,简体中文版权归石油工业出版社有限公司所有,侵权必究。

著作权合同登记号图字:01-2014-7357

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

编辑部:(010) 64523533

图书营销中心:(010) 64523633

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

2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.75

字数:330千字

定价:128.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

译者的话

叠前深度偏移技术目前已成为提高我国复杂构造成像精度的关键技术之一。做好叠前深度偏移除了需要适应复杂构造成像的先进偏移方法外,求取准确的速度—深度模型也是正确成像的关键条件。近几年来,提高复杂构造速度建模精度的技术发展日新月异,新方法层出不穷,寻找一本通俗易懂而简明实用的著作来进一步帮助从事地震资料解释的技术人员理解和掌握速度—深度模型建立基本原理和先进适用技术的需求更加迫切。

为此,我们组织有关专家花了近两年的时间翻译了 Ian F. Jones 所著的《叠前深度偏移速度建模入门》(An Introduction to: Velocity Model Building)一书。该书首先介绍了有关偏移成像和速度建模的一些基本原理和发展过程,然后深入浅出地介绍了目前业界常用主流速度—深度模型建立的方法。书中应用了许多海洋勘探实际生产中精细速度模型建立和成像效果的实例;详细分析了不同方法、不同精度速度—深度模型对最终成像成果的影响;介绍了许多速度建模技术的实际应用技巧。该书为广大处理解释技术人员认识速度变化规律、提高速度—深度模型建立能力和水平提供了非常有益的借鉴和参考。可作为已翻译出版的《地震资料叠前偏移成像—方法、原理和优缺点分析》(Etienne Robein 著)一书的姐妹篇,有助于提高我国的复杂构造成像技术的研究和应用水平。

本书第1章至第3章由王永明博士翻译,第4章至第5章由曹孟起博士翻译,第6章至第7章由赵玲芝高级工程师翻译,第8章至第10章由王克斌博士翻译。王永明博士、赵玲芝高级工程师、岳玉波博士、刘涛然硕士对翻译稿进行了复校工作,全书最后由王克斌博士进行了校译和统稿。

感谢中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院对该书出版给予的大力支持,同时也要感谢石油工业出版社有限公司的热情帮助。

高精度速度—深度模型建立方法技术含量高、技术流程和细节要求精细,对数学、地质、测井、计算机、地球物理知识和技能的一体化综合应用要求严格,也需要有丰富的速度建模实际经验,对翻译和校对水平都提出了非常高的要求,虽然我们进行了多次校译,由于我们水平有限,难免存在这样那样的翻译和理解错误,欢迎读者批评指正。

译者

2016年8月

前 言

本书来源于 2009 年笔者第一次在 EAGE 继续教育课程中讲授的速度建模内容。其目的是让读者对偏移的运动学原理及如何利用地震偏移成像中的速度和各向异性参数构建地下介质模型有一个直观（而不是数学上）的理解。在编写本书时，对原培训材料的内容进行了扩展：对为什么需要一个精细的速度模型和速度模型不准确会导致的后果进行了分析；探讨了速度建模中不确定性产生的根源及分辨率的限制因素等内容。本书通过对过去 30 年的速度建模技术发展历史进行回顾，力求使读者感受到计算机运算能力的不断增强和强大交互图形系统的出现所带来的速度建模这样的神奇技术不断进步和发展的脉搏。本书也论述了速度建模从一维的垂向更新方法到真正的三维层析更新的变化过程，即在速度估算及偏移成像中从以前单一线性划分的工业化生产过程到目前通过叠前深度偏移以迭代的方式构建可靠的地下速度模型的全交互、多学科方法的发展历程。

本书还有很多内容没有涉及。对大部分章节来说，所论述的内容只涉及纵波（P）地面地震数据和为深度偏移成像而利用这些数据反演速度模型的方法。而横波速度模型、非地震（如电磁和重力）和非地面地震数据等在本书中只是简要地提到。此外，本书在讲解这些技术时用的基本上都是深海数据，偏颇之处在所难免。

目 录

1 偏移成像的发展	(1)
1.1 偏移的作用	(1)
1.2 时间与深度	(2)
1.3 偏移分类	(5)
1.4 应用的数据域	(9)
1.5 偏移方法的发展	(9)
1.6 各向异性与偏移	(11)
1.7 多路径传播与偏移	(12)
1.8 单程与双程波传播	(13)
1.9 偏移算子和脉冲响应	(16)
1.10 积分偏移方法的算法噪声	(19)
2 精细速度模型与偏移	(24)
2.1 时间偏移的局限性和深度偏移的优势	(24)
2.2 适合速度场变化的偏移算法	(28)
2.3 不同地质条件下偏移算法的性能	(32)
3 速度建模的精度	(34)
3.1 精确性和准确性	(34)
3.2 不确定性、非唯一性和模棱两可性	(37)
3.3 分辨率的限制	(39)
3.4 误差量化分析	(44)
3.5 成像陷阱和速度模型质控	(45)
4 速度模型的表示与拾取	(51)
4.1 速度模型的表示	(51)
4.2 速度模型拾取的密度和自动化	(53)
4.3 拾取方法	(55)
4.4 速度模型拾取陷阱	(65)
5 反演与层析成像	(68)
5.1 反演的概念	(68)
5.2 层析的概念	(70)
5.3 层析反演与速度分析	(72)
5.4 分辨速度异常区尺度大小	(75)
5.5 层析的类型和应用域	(76)
5.6 旅行时(射线)层析	(77)
5.7 偏移域中的旅行时(射线)层析	(81)

5.8	波形(绕射)层析	(83)
5.9	层析反演中的一些重要问题	(84)
6	各向异性层析成像	(88)
6.1	各向异性及其相关参数	(88)
6.2	各向异性模型的建立	(94)
6.3	方位各向异性和裂缝检测	(99)
6.4	方位非均质性和多方位层析	(102)
7	速度建模技术演变历程	(105)
7.1	各向同性模型建立及深度转换	(105)
7.2	模型更新:拾取和反演	(106)
7.3	非层析技术的演化	(108)
7.4	层析反演技术的发展历程	(117)
8	层析迭代的更新	(124)
8.1	模型优化迭代循环	(124)
8.2	井数据库的引入	(125)
8.3	层析反演需要迭代更新	(127)
8.4	层状、网格和混合层析反演	(127)
8.5	混合层析的层约束方式	(130)
8.6	盐和玄武岩建模	(134)
8.7	有限偏移距与参数反演	(141)
8.8	利用方位层析反演地层非均质性	(143)
9	近地表和近海底环境对速度建模的影响	(146)
9.1	陆地环境影响	(146)
9.2	海洋环境影响	(148)
10	速度建模技术的未来	(162)
10.1	关于全波场的讨论	(162)
10.2	非地震资料的结合	(163)
10.3	全波形反演(波形层析或绕射层析)	(164)
10.4	波路径层析和波动方程偏移速度分析	(171)
10.5	不依赖于模型的偏移成像	(173)
	致谢	(178)
	参考文献	(179)

1 偏移成像的发展

在介绍速度建模技术前，有必要先回顾一下偏移的基本理论，并对偏移的作用进行一些简要的描述。与偏移相关的基础问题涉及地震波传播的两类主要理论（即射线理论和波动理论），以及基于这两类理论的不同偏移技术。这些理论阐述为应用正演技术产生合成地震数据和通过偏移技术将记录到的地震数据重新归位到其“真实的”地下位置奠定了基础。现在有许多偏移方法已在生产中得到了广泛应用。对于大多数偏移方法，除了它们的局限性影响了速度建模之外，方法本身运行方式的细节在这里并不重要。

1.1 偏移的作用

图 1.1 展示了一个当炮点和检波点均放在地表时声波从地下一倾斜层反射回来的试验。如果把所记录的地震道放在炮点和检波点之间的中点位置，请注意地震记录上的反射波同相轴并不在反射波真正产生的地下反射点位置。在这种情况下，真实的反射点位置相对于它的“视位置”向右侧偏离了。为了将反射波移回到其“真实”的空间位置，需要借助一个称作“偏移”的处理过程。

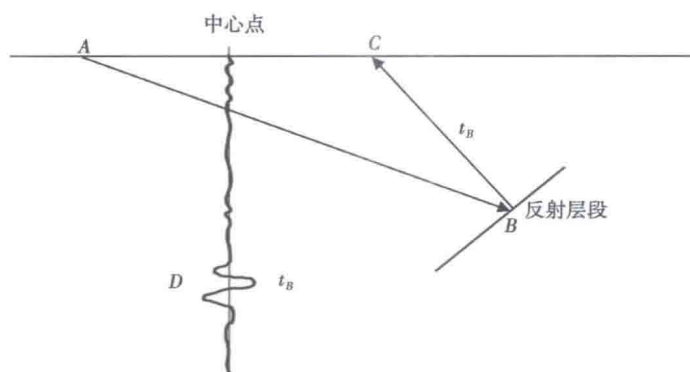


图 1.1 倾斜层反射试验

从地表炮点位置 A 到地下反射层位置 B ，再返回到地表检波点位置 C 的双程射线路径，其总旅行时为 t_B 位置 D 位于地表 AC 连线中点的正下方，也正是从真正的反射点 B 反射的能量在野外地震记录中所记录到的能量的位置

偏移是通过将记录的地震数据重新归位到（理想情况下）地下“真实”地质位置并生成成像结果的一个处理过程。炮点在地表位置激发后，地震波以一定入射角开始向地下传播，波前面沿着其传播路径向下传播到达反射层然后再返回并以一定的出射角到达地表上的检波点。波在地下传播过程中，由于速度的垂向变化会产生射线弯曲，偏移通过研究波的上述传播过程来求得地下反射层真倾角。偏移主要通过两种方法来实现：时间偏移和深度偏移。这两种方法既可以在叠后也可以在叠前实现。

正如后续章节介绍的那样，为了使偏移处理能够向前推进，时间偏移和深度偏移都需要估算地下速度场。随着对深度偏移的需求越来越多，为了得到更加准确的成像，就需要更加精确的速度模型。为了使解释人员及其他相关人员对“为什么深度偏移对提供油藏及其周边构造的可靠成像是非常重要的”背后的原因有一些深入的理解和认识，首先简要讨论一下与成像相关的概念，然后重点论述时间域成像与深度域成像的主要差异。

在本书中会提及深度偏移和深度成像：前者指的是运行偏移的实际处理过程，而后者指的是需要用偏移来进行速度模型迭代更新的过程。

1.2 时间与深度

时间与深度偏移的主要区别在于时间偏移不考虑所有的速度横向差异，而深度偏移则考虑了至少一阶的速度横向变化。换句话说，在与反射层深度相近的一个长度范围内，时间偏移是假设速度横向不变的（相当于一维层状介质，它可能包含了垂向压实了的速度梯度）。时间偏移只是尽量将成像点“移到”（偏移）更接近于其真实空间位置的地方，永远不要指望时间偏移后的位置代表地下的真实情况。相反，深度偏移在这方面具有其优势，理论上可将成像点放回其真实的地下空间位置。然而在实际应用中会发现，对深度偏移的过高期望在某种程度上会打折扣，特别是当准确估计速度模型能力不够，且承认地下地层存在速度各向异性的时候尤其如此。但是此时此刻“落实地下真实空间位置”的目标和决心正是迈开深度偏移探索的第一步。时间偏移基本假设的详细分析内容可参阅 Hubral (1977), Tieman (1984, 1995) 或 Black 和 Brzostowski (1994) 相关文献。

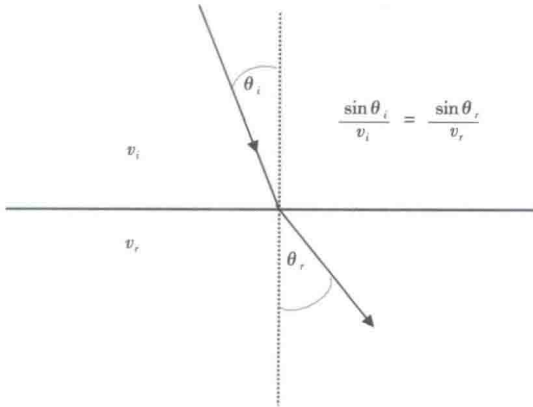


图 1.2 折射斯奈尔定律

下角标 i 表示入射介质；下角标 r 表示射线发生折射的介质

以相似的情况——光传播为例。当光线传播穿过两个具有不同折射率介质（例如空气和水）的分界面时，光线将发生弯曲（折射）。声波穿过两种不同声速介质的分界面时（按偏离界面法线方向的一定夹角），声波也会发生弯曲（改变方向）。折射程度可由斯奈尔定律（图 1.2）描述为：

$$\frac{\sin \theta_i}{v_i} = \frac{\sin \theta_r}{v_r} \quad (1.1)$$

式中， θ_i 和 θ_r 分别代表入射线和出射线与法线（与界面垂直）的夹角； v_i 和 v_r 分别代表分界面上、下层介质的声波速度。

只要有速度变化（不论是在速度突变界面还是具有速度梯度的介质中）的地方，射线都会发生弯曲。深度偏移处理就是校正射线弯曲的影响，以使地下目的层准确归位到它的正确（地质上的）位置上去。

如前所述，在与反射层深度相近的一个长度范围内，时间偏移假设速度是横向不变的。因此对于地下倾斜反射界面，时间偏移应用斯奈尔定律时，假设倾斜反射界面上反射点附近的界面是局部水平的（图 1.3）。所以我们还不能简单地得出时间偏移不遵从斯奈尔定律的结论。准确的说法是时间偏移是把斯奈尔定律应用到地下模型的一个不正确的版本上了

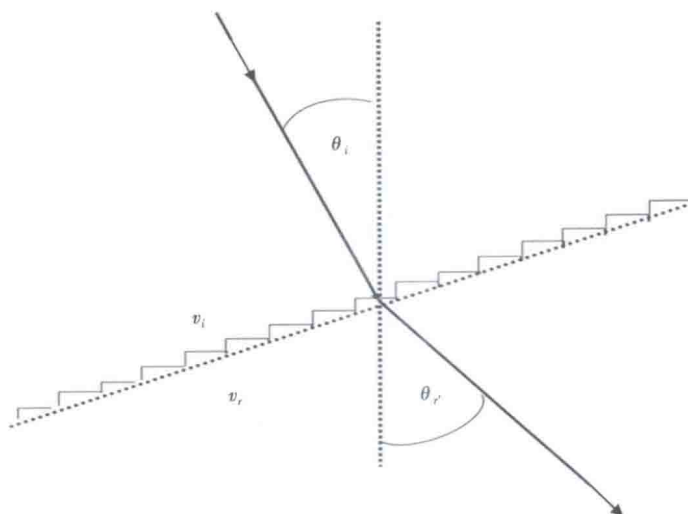


图 1.3 在倾斜界面上，时间偏移把分界面当成是局部平坦的，时间偏移会把倾斜界面“看作”好像由许多台阶状的水平段组成，对“局部平坦”的层段可“正确地”适用斯奈尔定律。

时间偏移成果得到了一个出射角为 $\theta_{r'}$ 的折射同相轴

(Robinson, 1983)。因此，对于沿法线方向入射到倾斜界面的射线（图 1.4），时间偏移把该射线视作入射到水平界面上，这样就产生了一个不合适的折射，表示为

$$\theta_{r'(\text{time-mig})} = \arcsin\left(\frac{v_r}{v_i} \sin\theta_i\right) \quad (1.2)$$

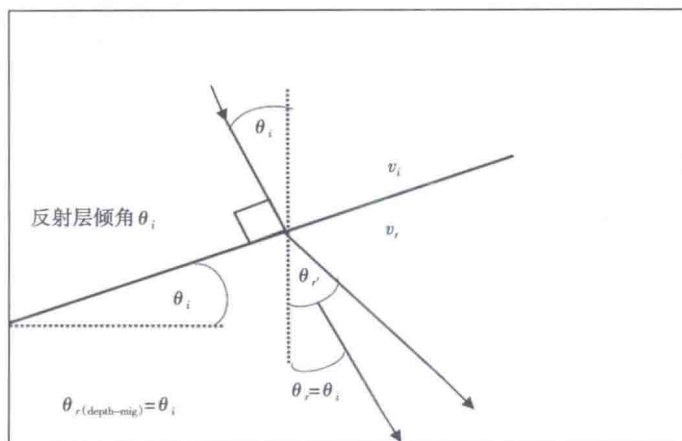


图 1.4 当射线沿法线垂直入射到倾斜界面时，深度偏移不会使射线偏折，但时间偏移却肯定会使射线偏折

式中， θ_i 是折射界面的倾角； $\theta_{r'(\text{time-mig})}$ 是来自于时间偏移的出射（折射后）线与法线（垂直于折射界面）的夹角。与之相反，对沿法线方向入射到倾斜界面的射线应用深度偏移，正确的射线路径会在没有折射情况下出射，因此可以得到

$$\theta_{r(\text{depth-mig})} = \theta_i \quad (1.3)$$

以上描述是基于射线理论提出的。基于射线理论的深度偏移对于正确的地下介质模型来说适用斯奈尔定律。对于波场外推技术，在处理速度横向变化时，会遇到同样的问题要解决。许多波场外推偏移（WE）技术都隐含地处理了速度横向变化的问题，但是有些方法含有一个考虑射线弯曲的特殊校正项，即“薄透镜项”，其名称来源于几何光学（例如 Claerbout, 1985）中相应的表述。

时间偏移和深度偏移的另一个区别是时间偏移是按双程旅行时输出成像结果的（所以仍需要实施一些后续的时深转换，将已成图的时间域层位进行时深转换用于求得地下地质构造和储层的深度。参见实例：Armstrong, 2001；Armstrong 等, 2001；Bartel 等, 2006；Cameron 等, 2008；Iversen 和 Tygel, 2008）。相反地，深度偏移是以视垂直深度输出成像结果。如果在偏移过程中正确地应用了相关地下介质参数的话（速度、倾角、各向异性），那么所得到的地球物理成像结果应该和地下真实的地质结构相一致。然而不考虑各向异性的深度偏移一般不能得到真实地质深度的成像结果，因此后续还需要一些从地球物理到地质深度的拉伸标定（各向异性在第 6 章讨论）。如果不能正确地刻画横向速度变化特征，深度偏移同样将会导致横向和纵向位置误差，并且仍然无法与真实的地质深度吻合。

前面我们提到过，偏移的目的就是通过把已记录的地震数据重新定位到地下“真实”位置上，从而实现用已记录的地震数据重构成像结果。图 1.5 显示的是一个反射层的几何图形和一个在地表上通过同一位置炮点和检波点自激自收方式激发声波后接收到的反射信号。偏移过后，所记录的地震信号从反射层的倾斜段移动（偏移）到地下实际的地质位置（Chun 和 Jacewitz, 1981）。偏移过程中，一段输入记录的地面地震数据（ CD ）重新归位到其正确的地下位置（ AB ）。偏移处理（时间和深度）使该段长度变短（ $AB < CD$ ）和反射界面的倾角变陡（ $\theta_{mig} > \theta_{in}$ ），因而 $\sin \theta_{mig} = \tan \theta_{in}$ 。

在图 1.5 中，可以把偏移看作为从位置 C 的记录面元开始按以 r_A 为半径的圆弧向上摆动到位置 A 。在时间偏移中，对零偏移距记录来说，图 1.5 所示的弧线是圆形的，而对于非零偏移距记录，弧线是椭圆形的。在偏移中的这个过程就定义了所谓的偏移算子。对二维时间偏移来说，在零偏移距记录上，这个算子是对称的圆弧；在其他非零偏移距上，这个算子则是对称的椭圆弧（炮点和检波点在椭圆焦点上）。对于三维时间偏移，其上述响应分别是

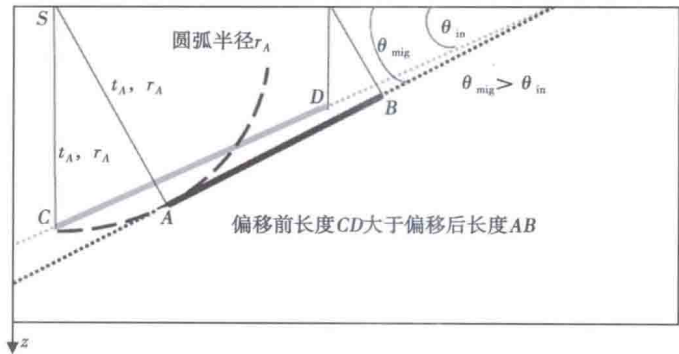


图 1.5 对零偏移距炮点和检波点自激自收记录来说，从地表 S 点到地下反射位置 A 射线路径的旅行时间为 t_A ；它同时定义了由 S 点到它正下方 C 点的旅行时。 C 点是射线在实际地下位置 A 点反射后在野外地震记录上的反射能量位置。对于一个常速为 v 的介质，我们可以画一个半径为 r_A 的圆弧，其中 $r_A = v \cdot t_A / 2$ ，记录到的反射段长度 CD （图中灰色显示）大于偏移后（实际的）反射层段长度 AB （黑色显示）

半球形碗和拉长的椭球体。对于深度偏移，算子会更加复杂，因为旅行时要通过空变的速度场转变为距离（而不是时间偏移所假设的应用简化的局部一维垂向函数）。正如后续将会看到的那样，时间偏移和深度偏移最主要的区别是时间偏移实质上忽视了速度的横向变化，从而导致偏移算子更为简化。

偏移的原理在很多优秀的教科书中已经讲过了（例如，Claerbout, 1976; Berkhout, 1985; Bancroft, 1997; Fagin, 1999; Yilmaz, 2001; Robein, 2003; Biondi, 2006），这里只详细研究偏移算法是如何实现的，还有一些对这些算法进行近似而产生的后果。

1.3 偏移分类

1.3.1 波动与射线

偏移算法可以分为两大类：第一类是积分方法（它包括克希霍夫、等效偏移距、共反射角和束偏移技术）；第二类为差分方法，即应用波场外推方法求解偏移方程（包括逆时偏移和波场外推偏移。逆时偏移尽管名字是时间偏移，但它依然是一种深度偏移方法；而波场外推偏移被一些人称为“波动方程偏移”，这会产生一点点误解，因为所有的方法都是在求解波动方程）。无论是时间偏移还是深度偏移，都既可以用积分方法（射线）也可以用差分方法（波场外推）来实现。

然而由于克希霍夫积分偏移也可以通过延拓技术来实现，反之亦然，所以上述区别也会变得模糊不清。

上述引言段落中谈到了积分和差分方法。这个描述可以拓展到包含射线和波动的概念。因为声波是沿着一个不断扩展的波前面在地下传播的，看起来有点像是个不断扩展的半球状碗，随着波前面的向下传播，传播中波前面的振幅不断地衰减，就像是一个涟漪在池塘水面上扩散出去一样，有一个特有的细浪跨越涟漪的前沿。对于一个常声速介质，波前是一个半球面；当介质的声波速度不为常数时，波前面会以独特的方式发生扭曲变形。

使用波动理论模拟池塘中的涟漪是可行的。它需要启动一个扰动源（比如把一块石头扔到水里），并计算该扰动是如何在时间和空间上变化的。类似地，也可计算这个过程的逆过程：只要给出任何时刻涟漪的大小和位置，就能计算出该时刻之前的某时刻涟漪的大小或位置。由于波动是由差分方程描述的，因此这类方法也被称为“差分”方法。在上述逆过程中，由于波表现为向后移动，所以这个过程又被称作为“向后”外推或者“反向”外推。同样地，对于在地下传播的波来说，模拟波的传播过程或者在偏移中反推波的传播效应可以通过考虑地下一个深度切片到下一个深度切片的位置及振幅差来实现。另一种对传播中的波前面描述需要考虑传播中的波前面法线，并绘制（追踪）这些法向量随时间变化的演化过程。这些向量被描述成“射线”，指示了波前面的传播方向和沿相应射线路径波前的到达时间。然而波也可用具有特定频率、大小（振幅）和零时刻处的数值（相位）的正弦或余弦函数来描述。在最简单的表述形式中，射线不一定需要振幅或相位信息。换言之，“射线”是波传播过程的简化描述，射线描述可以告诉我们波前面由一点传播到另一点要用多长时间和（或）波传播的方向。这个信息对于正演模拟（也就是制作合成记录）和完成初步偏移来说已经足够了。然而，通过考虑主要“中心”射线及其邻近射线的特性（Cerveny, 1981），射线描述方法也可扩展用于包含波的动力学（振幅）效应，并且目前基于射线理论的偏移和正演方法完成了这一点。

当声波的波长小于所遇到速度异常体的标度长度几倍时，用射线来近似描述波的传播规律是可以接受的（图 1.6）。一旦速度异常体的尺度比地震波长小的时候，那么波遇到速度异常体时将发生散射而不是折射（图 1.7）。正是基于这个原因，射线方法有时又被描述为“高频近似”。

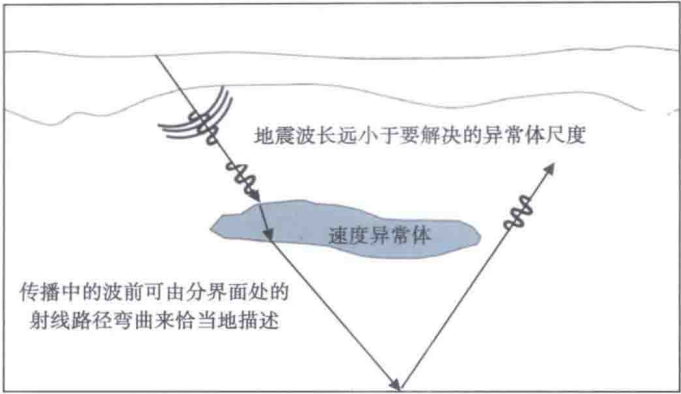


图 1.6 速度异常体尺度大于地震波长时射线理论有效

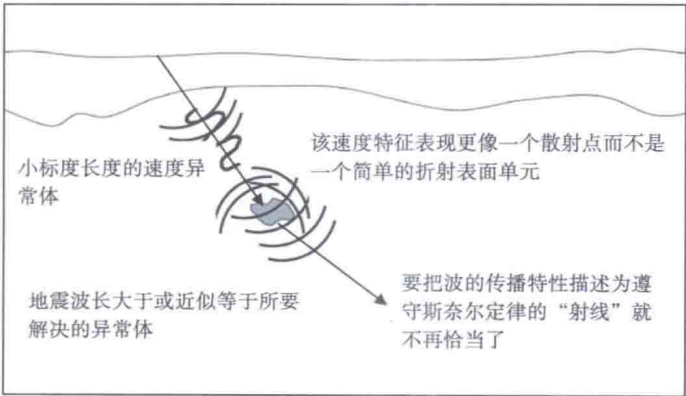


图 1.7 速度异常体尺度与地震波长相差无几时射线理论失效，用绕射（散射）理论来描述波的传播更好

1.3.2 积分与差分方法

最近已用到的术语也有必要提一下，有些作者把缩写“WE”定义为术语“波动方程”以区别于积分法。但由于所有的偏移方法实际上都是“波动方程”的解，用这个术语叫法把所有积分方法排除在外就会令人十分困惑。这里把差分方法称为波场外推（WE），因为这种缩写与常用的波动方程偏移的缩写是可以互换的。

积分方法（比如克希霍夫、等效偏移距、共反射角和束偏移等）是求波动方程的高频近似解。首先把每个到达旅行时视作一个脉冲状同相轴，然后对这些同相轴振幅做适当的加权，再通过稳相位分量进行叠加，其叠加求和的结果就重构了最终的偏移结果。积分方法的最基本特征是偏移可以在一个子集（例如一个道集、一个深度切片或者某条成像测线等）内运算，并且该方法可以很方便经济地为速度分析提供所需要的道集（Gao 等，2006）。在应用积分方法进行旅行时计算或叠加求和的过程中，也可以很便捷地通过倾角限制参数来达

到减少某些类型的相干噪声和降低计算成本的目的。此外，积分方法对最陡倾角反射的成像适用性也很好。

使用最广泛的积分方法是单路径的克希霍夫积分法，它通常既可在时间—空间域实现，也可在频率—波数域实现（Elegn 等，1997）。克希霍夫偏移过程可分为两个阶段：首先是沿着通过速度模型射线路径的旅行时计算（Nichols，1994；Nichols 等，1998），然后是与这些传播路径相关的信息求和。虽然克希霍夫积分法可以解决从一个炮点—检波点对到给定反射面的多个可能射线路径问题，但更常用的是单射线路径（会在本章稍后的“多路径”部分中讨论）。其他的方法包括班克罗夫特（Bancroft）提出的等效偏移距法（Bancroft 和 Geiger，1994；Bancroft 等，1998）和各种束偏移方法（参见 2009 年 9 月的 *The Leading Edge* 特刊）。科伦（Koren）等人提出的共反射角偏移（CRAM）方法（2007；2008）是从地下每个反射点开始计算射线路径（而不是像克希霍夫偏移方法计算地面点到地下反射点的射线路径）。它设计的加权函数用于加大对形成成像结果有利的相干信号的权重，因此这项技术在某些方面类似于束偏移，但它提供了多种有用的体属性信息，例如局部反射面倾角和方位角，以及在反射点射线的出射张角及方位角。而束偏移的目的，是将地表炮点位置的入射角和检波点位置的出射角与入射到地下某反射界面段可能的反射波射线路径建立对应关系。对地下所有的这种反射界面段进行该运算，通过只提取靠近该射线走廊的信息求出成像结果。为了将最初计算得到的时间—斜率转换成角度，需要速度场信息，并且和其他偏移方法一样，需要以迭代的方式来不断优化（尽管像后面提到的，斜率信息也可以不需要偏移步的迭代而直接转化求得）。

高斯束偏移方法最先是由波波夫（Popov）在其俄文文献中（Popov，1982；Babich 和 Popov，1989；Paopv 等，2007）提出。后来其他人（Cerveny，1981；Cerveny 等，1982；Hill，1990，2001；Cerveny，2001）进行了更复杂的应用实践工作。该方法的优势在于：处理多路径和通过仅在一条窄路径轨迹邻近区域内计算算子来降低成本（Wang 和 McClay，1995）。这项技术还可以在不同的域内实现（例如 Lazaratos 和 Harris，1990）。高斯束偏移可以设想为 3 个阶段：测量输入的共炮点、共检波点或者共偏移距道集出现的时间—斜率，然后计算与这些时间—斜率有关的旅行路径，最后对与这些旅行路径有关的信息进行求和。这些方法中最完整的是高斯束偏移方法，但现在已发展出了更多的近似方法，并以各种各样名称（如快速束、简约束、控制束）在实际生产中应用。

在所有积分方法中，一旦计算出旅行时或射线角度，然后就需要选择对每个成像点有贡献的样点。对于克希霍夫偏移来说，在算出旅行时之后（图 1.8），只收集在一定孔径和倾角范围内的数据样点。而对于射线束偏移，我们选用计算出的射线管（或“束”）临近区域的数据样点，这样射线路径长度变化小于横跨高斯束宽度的一个波长的四分之一（即菲涅尔带），所以只有相干能量被求和用于获得成像结果。在某些射线束偏移方法中，用一个代表性的子波来模拟在每个有贡献并拾取出的倾斜段上的数据，并且对这些子波贡献求和形成成像结果。在一些射线束偏移方法的实现过程中，局部相干同相轴的时间、 τ 值和视速度或时间斜率（经常用参数“ p ”来表示）等参数是在输入的炮域和偏移距域求取的（图 1.9）。然后，局部 τ - p 值与相干阈值值结合在一起，来选择数据的主成分。

射线路径从地表炮点和检波点的位置开始计算，沿着这些路径的旅行时可用于分析确定来自炮点和检波点路径的交点，这样，就找到了这一特定射线路径的成像点，将与这一成像单元相关的能量求和输出到考虑菲涅尔带的成像空间（图 1.10）。

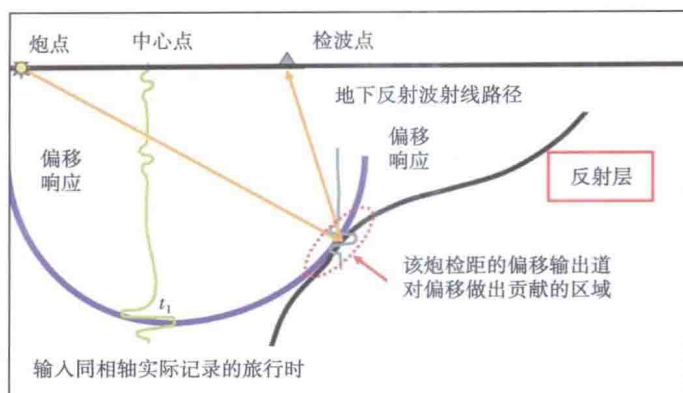


图 1.8 克希霍夫偏移把输入道的能量复制到沿脉冲响应的所有位置上。脉冲响应是根据选定的最大倾角和最大横向孔径（通常称为算子半径）计算出来的。然而只有其中的一小部分能量对偏移结果是有用的，其余的能量会产生噪声

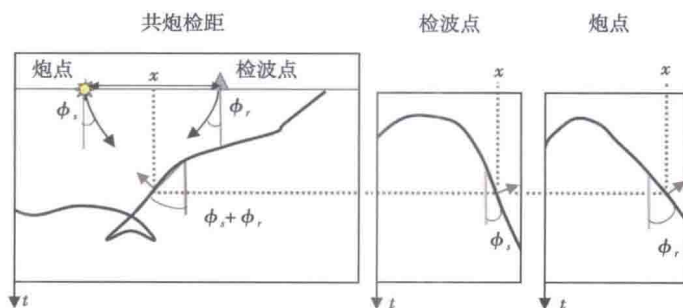


图 1.9 在炮点、检波点或共炮检距道集上求取局部时间—斜率值。这些斜率与炮点和检波点位置的地表出射角有关。利用地表速度，时间斜率 (ϕ) 可转换为角度 (θ) 用于射线追踪。通过只在出射角射线路径的临近区域进行射线追踪，仅计算出对地下实际反射段偏移有贡献的射线束就可以计算出来

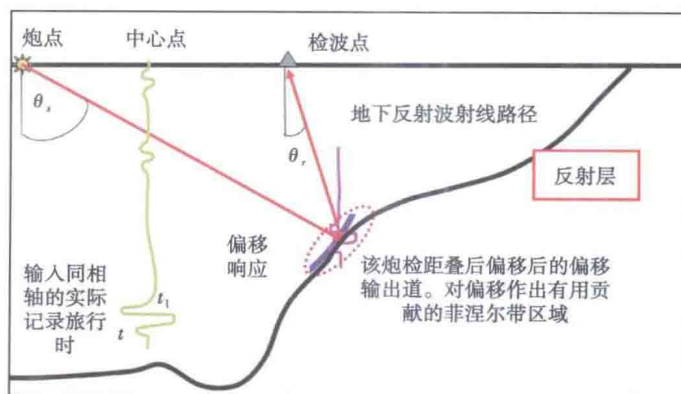


图 1.10 射线束偏移只把输入道能量复制到靠近地下实际反射段的位置上。因此比克希霍夫法减少了算法噪声

表 1.1 总结了使用射线或差分方法实现时间偏移和深度偏移的不同组合。同时也有许多射线和差分偏移方法的混合版本（比如“相位屏”法、“分步傅里叶加内插”法等）。

表 1.1 时间偏移、深度偏移与射线法、波动法的组合

方法 \ 类型	时间偏移	深度偏移
射线（积分）高频近似方法	克希霍夫，射线束，等效偏移距	克希霍夫，射线束，共反射角偏移(CRAM)
波场外推（差分）方法	有限差分相移，Gazdag $[v(t)]$ 相移	有限差分，相移加内插，逆时偏移

1.4 应用的数据域

时间偏移和深度偏移方法可以应用到各种不同的“域”，应用域是一个和我们正在使用的描述类型（即波动或射线）截然不同的话题。常见的域有时间—空间域 (t, x, y) 、频率—空间域 (f, x, y) 、频率—波数域 (f, k_x, k_y) 以及零偏移距时间和射线参数域 $(\tau-p)$ 。选择一个域代替另一个域的原因就是要利用这个域节省计算时间或减少某一类噪声的某些特性。例如，对于一个有效频宽为 5~55Hz 的信号，频率—空间域 (f, x, y) 的波场外推偏移可以通过只偏移到 55Hz（舍弃所有高于这一频率的所有频率）来节省成本。如果同样的算法放在时间—空间域 (t, x, y) 来实现，这种成本节省的优势将无法发挥，也不能在偏移过程中很轻易地滤除输入数据的高频噪声。

除了偏移应用域之外，还要考虑输入数据集的问题。在炮点“放炮”激发的地震波传播到地下再反射回来被许多地面检波器接收，然后许多独立的炮点再重复这个过程，从而采集得到地面“炮集”地震数据。由此产生的大量采集数据可以基于某些分选准则来分组并重排而形成各种不同的数据集。所用的偏移算法（例如在频率—空间域的波场外推）可以应用到这些不同分选顺序的输入数据上，例如共炮点道集（通常是野外采集到的数据集）、共检波点道集（某一检波点接收到的来自所有可能炮位置的全部贡献道数据）、共偏移距道集（具有相同或相近偏移距的所有炮点—检波点对数据）等。为什么要用一种排序代替另一种排序呢？这里有很多原因：例如缓解数据存取的吞吐量或者满足一些算法近似的需要。

1.5 偏移方法的发展

求弹性波动方程的精确解并不是我们现在要去实现的目标。在实际工作中，多种不同的简化假设就会求出一系列从较简单到最复杂的波动方程解。随着计算能力的增强和交互速度模型更新技术的发展，这一系列解都将会毫无悬念地得以实现。这些简化方法的综述和它们与弹性波传播基本方程的关系可以在 SEG 再版丛书《弹性波理论经典》（Classics of Elastic Wave Theory）中找到（Pelissier 等，2006）。该书描述了运动方程从 17 世纪到 20 世纪的发展历程。在更专业的深度偏移书籍中，SEG 再版丛书之一《叠前深度偏移和速度建模》（Jones 等，2008）也对这些简化方法进行了讨论。

从 Navier 方程（处理弹性波在固体中的传播）的 Stokes 公式开始到很多数学上容易实现的算法，对这些方程的第一步简化就是舍弃了剪切项。Stokes 公式是对各向同性介质柯西关系式更为通用的表述，而 Christoffel 公式是用来描述波在各向异性弹性介质中传播规律的，

Navier 方程主要是针对具有单一弹性常数方程的 (Pelissier 等, 2006)。目前的方法求解的都是声波方程。也就是说, 求解中忽略了剪切模量和界面处的转换波 (这相当于将地下所有的岩石当做流体)。

过去 30 年来, 具有工业化实用价值的弹性波动方程的求解历程可以用如下的近似和限定来归纳:

(1) 舍弃剪切项来把问题限定在只求纵波解。

(2) 将波动方程的解分解为上行和下行两部分, 并将其分离得到单程波动方程的解。

(3) 避开测量在地表的垂直压力导数 (二阶偏微分方程求解的必要边界条件) 的要求, 通过采用一个旁轴 (抛物线解) 来寻找地震波接近垂直入射角传播的解。

在 20 世纪 90 年代初期之前, 计算机能力的限制使偏移技术仅局限在叠后时间域。对一个共中心点道集来说, 首先对道集内所有道进行非零偏移距旅行时差校正 (动校正), 然后把该道集的所有道进行相加以减少数据量, 这个过程就叫叠加。叠加后的数据名义上被放到零偏移距位置, 就好像它们是用自激自收方式采集的数据一样。直到 20 世纪 90 年代中期深度偏移投入应用之前, 叠后时间偏移一直是主流的偏移方法。当时三维地震数据叠后深度偏移 (postSDM) 的常用方法是通过使用频率域隐式差分算法 (FD) 实现的 (该方法是由 Claerbout 教授在 1976 年的一篇地球物理论文中首先提出的)。为了便于用有限差分法求三维波动方程的解, 人们 (Jakubowicz 和 Levin, 1983; Gibson 等, 1983) 提出了一种叫做“分裂”的技术。该技术是将一个独立的二维解应用在主测线 (x) 和联络测线 (y) 方向上。它包括把一个平方根方程 (包括空间变量 x 和 y) 分解为两个独立的平方根项, 两个空间变量的每一个变量对应上述的每个平方根项。正是这种分裂或数据的 x 分量与 y 分量的分解引起了“数值各向异性”问题——即产生一个脉冲响应。该脉冲响应不具有常速介质中特有的圆形 x - y 剖面特征 (这个名词通过与物理学的各向异性类比而得到, 各向异性造成地震波沿着不同方向传播的速度不同, 从而导致了非球形的波前面)。

每一个生成的平方根项再通过级数展开来近似, 但对级数的截断会导致在偏移结果中超出某个倾角的能量无法正确地归位。虽然使用更高阶级数展开来逼近平方根项可以获得更好的倾角响应, 但是这样会大大增加偏移的计算成本。因为这种级数展开近似在近似不再有效的较陡倾角处没有一个内在倾角限制的截止点, 一旦超出该倾角限制它就会直接简单地把偏移能量放到错误位置上。这样就引入一种形式的噪声, 其能量可以在某一给定角度以不可思议的高速向外传播 (这样陷入解空间的渐进于零的区域, 换言之会引起平方根项的负数出现)。在 20 世纪 90 年代后期以前所做的大部分偏移都是各向同性的。但是, 当要研究非椭圆各向异性介质时, 我们就要面对一个新的问题——如何求针对声学近似的有限差分解? 因为各向异性特征只有在弹性介质中才能得以正确地描述。因此, 又产生了另一类针对非椭圆各向异性介质的有限差分声学近似的算法噪声 (Bale, 2007)。此外就数据的采样网格而言, 使用有限差分法求解波动方程的二阶差分项, 也会由于随频率变化产生轻微的能量归位不准问题。这就导致了一个类似频散的现象。在这种现象中, 不同频率的能量看起来是以不同的速度传播的, 这样在偏移过程中单个倾斜同相轴会分裂为一组频率成分和倾角不同的同相轴 (Diet 和 Lailly, 1984)。但是引入显式延拓法后避免了有限差分法的这种弊端, 这种可使陡倾角构造实现高保真的叠后深度偏移算法在 20 世纪 90 年代中期得到了广泛应用 (Hale, 1991a, b; Soubaras, 1992, 1996)。

在展开平方根项时, 必须要考虑解的符号。一个平方根可以得到正负两个解。从最近回