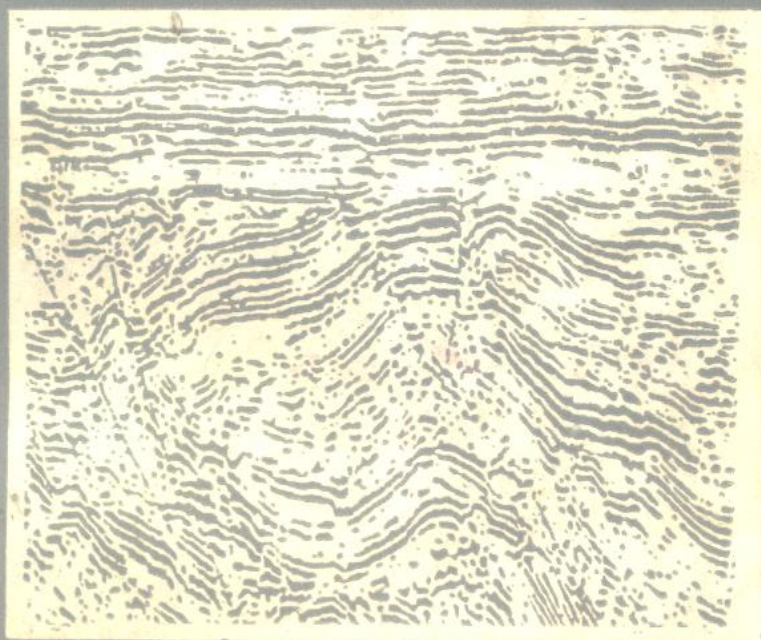


地震成像理论及方法

(美) J.F. 克莱鲍特 著



石油工业出版社

070080

P631.414/001



00681957

地震成像理论及方法

[美] J.F. 克莱鲍特 著
许云 译

5969/13



200295162



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者《地球物理数据处理基础》一书的续篇，阐述了地震成像的物理意义和数据处理实现方法。它不仅论述了波数频率域方法、克希霍夫求和法、有限差分法，还论述了倾斜叠加、多次反射、速度估计、波场横向变化等有关问题。

本书的重点是物理意义的阐述，数学推导较少，适合研究生和大学高年级学生阅读。每章备有思考题和习题，可作参考教材和自学之用。

本书是作者及其科研集体多年研究地震成像方法的科学总结，有较高水平和学术价值，包含了不少新颖的概念，故也可供地震生产工作和地震科研工作方面的人员参考。

Imaging the Earth's Interior

J. F. Claerbout

Blackwell Scientific Publications

First Published 1985

地震成像理论及方法

[美] J. F. 克莱鲍特 著

许 云 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 $16^{1/2}$ 印张400千字 印1—2,000

1991年1月北京第1版 1991年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0477-1/TE·458

定价：4.95元

序 言

反射地震学家是要获得地层内部的映像。直到60年代为止，成像都是按一种特定方式实现的。在1968年至1972年这段时期内，我构思出一种直接基于波动方程的新型成像方法，并经过了野外观测的检验。以前都是从简化了的假想模型出发，利用波动方程来预测观测结果，而在常规的数据分析中则未采用波动方程。我提出的有限差分的成像方法在石油勘探工业中很快就得到了推广应用，随后，有许多其他人士也迅速参与其事，并作出了一些重要改进。早期的特定成像方法经过重新解释，亦按照波动理论加以完善了。

由工业部门资助，在斯坦福大学成立了一个名为SEP（斯坦福勘探计划）的小组，专门从事这项技术的研究。在48个资助单位中，许多单位都设有自己的具有良好素质的研究部门。70年代中，取得许多进展的十年就这样开始了，在80年代，继续大步前进。

写作本书之目的萌生于向进入勘探领域的新手讲授这许多新概念中最精采部分的需要，考虑到来自地球物理领域以外的人很多，我已使地球物理专门术语保持至最低限度，并且对每个术语均作了定义。因此，料想本书不仅对有志于石油勘探的人们，而且对所有从事波场分析之学科领域中的专业人士都将有所裨益。

我以前写的《地球物理数据处理基础》^①一书出版于1976年，最近业已重版。该书内容涉及反射地震数据处理的很多基本问题，诸如Z变换、傅氏变换、离散线性系统理论、矩阵、统计学，以及层状地层构造理论等等。该书也介绍过波动方程成像方法，然而，现在看来，进行广泛增补已变得很有必要了，本书就是由这些增补演化而成。这两本书之间的不同之处约占90%，重复的部分占10%，这是出于使本书能独立成书之目的。

本书对石油勘探中所采用的数据处理技术的整个领域进行了紧凑精练的总结回顾，它是斯坦福大学勘探地球物理课程中的基本教科书，不过，我并未奢求这本书是包罗万象的百科全书，对于反褶积与静校正这样一些重要的处理方法，只是略加叙述，一带而过，对于层析成像方法的实际应用这类内容亦复如是，而其他一些技术方法，诸如射线追踪（参阅Cerveny, 1977）及许多种类的正演模拟方法等，则均略而未提。很遗憾，仅有关偏移方法的文献就已够浩瀚的了，以致对象Kirchhoff偏移方法在理论方面的一些显著贡献（参阅Berkhout, 1980）也不得不舍弃了。

地震成像是一项从数学与物理学中汲取了许多内容的课题，这些题材按照一种逻辑顺序将一项概念建立在另一项概念的基础之上；我是按类似顺序选择组织本书内容的，这样组织内容有利于想透彻理解材料内容的新入学的学生。四处散布的一些有关实际问题难免为逻辑结构所遗漏，为此，书末附有详细索引和上百篇涉及多种问题的参考文献，以供读者查考。

更为广泛的论述反射地震学的专题教科书有Waters（1981）与Sengbush（1983）的著作。着重于石油勘探方面的描述性讨论反射地震学的书，有Sheriff（1980）与Anstey（1980）等的著作。Aki与Richards（1980）以及Kennett（1983）诸人写的书是关于天然

^①该书的中文译本于1979年由石油化学工业出版社出版。——译注

地震学方面的补充读物。

我还试图使本书适合于那些想学习这些概念而对数学只想作略读的读者们的需要，个别章节（各节都是一讲）在进行数学分析之前都尽可能地使之包含有实际问题的描述说明，各章本身也是按此方式安排，因此，比方说，在你读第一章读到中途时，你可以跳过去直接去读第二章。

波动现象恰好是美妙的几何学研究对象，利用很少一点数学分析就能学到很多内容，但是，你应该是事前已经通晓了微积分、复指数和傅里叶变换等基本知识，之后再开始读本书为好。

理论与实践之间总是存在有“空白”的。许多书都没给你提供有关“空白”之所在及其范围的确切线索——即使是勘探地球物理方面的书籍也不例外。对这种“空白”，没必要感到困惑不安，这正是研究课题活力所在——任何科学具有发展活力都是如此。“空白”就是一个活动目标靶子，它涉及范围的大小就看你采取什么观点研究它了，所以，我得冒些风险告诉你，该作什么，不该作什么；什么是重要的和什么是不重要的。观点总是超越于事实的。你要是既不了解某些观点，又不了解实际，你的知识就不会是完整的知识。当我解释说明理论与勘探实践之间的脱节时，以及当解释说明应该作什么而看来还没这样作的时候，你将会既获得观点又获得事实^①。

^①在中译本中做了节译。——译注

目 录

引论	(1)
第一章 成像方法概论	(4)
1.1 爆炸反射面	(4)
1.2 起二维滤波作用的波场外推	(12)
1.3 四种广角偏移方法	(18)
1.4 物理基础	(28)
1.5 旁轴波动方程	(37)
1.6 二维傅氏变换技巧	(42)
1.7 典型程序	(45)
第二章 为何采用时空域处理	(52)
2.1 波场外推方程	(55)
2.2 有限差分	(61)
2.3 单频波的程序	(69)
2.4 分裂法与全分离法	(76)
2.5 递归倾角滤波	(82)
2.6 延迟坐标	(85)
2.7 (t, x, z) 空间内的有限差分	(88)
2.8 稳定性简介	(92)
第三章 炮检距——另一种维数	(96)
3.1 吸收作用与微聚焦	(100)
3.2 倾角影响	(105)
3.3 以双平方根方程实现观测排列延拓	(112)
3.4 双平方根方程的意义	(119)
3.5 叠加与速度分析	(125)
3.6 偏移与速度估计	(136)
3.7 横向速度变化	(145)
第四章 波场外推的技巧	(152)
4.1 波场外推的物理问题与修饰处理问题	(153)
4.2 各向异性弥散与波场偏移精度	(162)
4.3 频散与波场偏移精确度	(168)
4.4 吸收边界	(174)
4.5 傅氏变换偏移方法的调整	(178)
4.6 阻抗	(183)
4.7 精度——承包人的观点	(195)

4.8	Muir与Godfrey的保险稳定法	(201)
第五章	若干发展前沿	(205)
5.1	径向记录道	(206)
5.2	倾斜叠加	(208)
5.3	Snell波与斜坐标	(215)
5.4	根据线性时差校正确定层速度	(221)
5.5	多次反射与当前实际	(227)
5.6	多次反射处理方法的前景	(237)
5.7	剖面成像	(246)
5.8	未来十年的展望	(249)
参考文献	(251)

引 论

石油勘探是从地震测深开始的。用计算机将回声处理成可以揭示出许多地质历史的映像。就全球范围而言，回声测深与映像处理就构成了大约每年40亿美元的经济活动。

1. 观测的意义

石油与天然气的存在，对地震反射的直接影响很小。岩石体积比烃类的体积要大很多倍，不过，利用各种不同类型岩石之间的分界面，是可以很好对比追踪反射的。多孔隙岩石中的烃类可以自由流动，流体有升起的趋向，岩石分界面的形状可以告诉我们什么地方可能有烃类聚集。在北海中部发现石油与天然气是反射地震方法极为成功的一个例子。当以反射地震学方法确定井位的第一口勘探井正在钻进之际，谁也不可能预料他们是否会钻遇石油，可是，一旦当北海下面不论什么地方发现了石油，人们就会对如此确定的井位比随机定位的那些井确实是更有利得多这一点抱有更大的信心。事实证明，的确如此。

在一口井已经钻完并完成了测井之后，反射映像就变得更为有价值了，因为根据它就可以知道相应于每个回声反射是什么岩石类型。地震学通常能够提供关于距井若干距离之处岩石类型的出色的精确图像，特别有价值的是可以了解岩石沿什么方向上倾和地层在什么地方被断层所断裂。地震学提供这种信息，其费用比多数钻井费用低得多。在转移至海上进行石油勘探时，地震费用降低一个数量级，而钻井费用则要升高一个数量级。

2. 观测资料的可重复性

反射地震资料数量庞大，它不是用铅笔在一张纸上画的记号，而是一盘接一盘的高密度磁带。有些地震资料很容易理解，但是有许多却不那么容易，尤其是初次试验时的资料。虽然许多资料不易理解而且看上去还有噪音和随机干扰，但值得注意的是这种资料在试验中是可重复的。我们发现，用这种资料进行工作，可以认识到越来越多的东西，于是受到鼓舞而继续作下去。因为在以常规方法采集的数据中仍然有许多信息隐藏其中，所以本书主要集中于占主导地位的野外数据观测布置，即通常具有近地表震源与接收器的单次测线。各种观测技术仅作说明而不加以研究。

3. 作为成像工具的计算机

哲学家提出问题：“何谓认识？”。作为技术人员，我们的回答是：只要现实世界存在，在我们心中也就存在它的一个映像。所谓认识，也就是意味着这二者是相似的。为有助于形成映像，我们使用了显微镜、望远镜、摄影机、电视机等等这样一些成像装置。在本书的描述中，计算机则是地震回声测深的成像工具。

计算机作为成像工具，在许多方面是颇为理想的。望远镜是受其组成部件质量限制的，而计算机所形成的映像，很大程度上是受我们对数学、物理学和统计学的理解深度所限制，而不是受计算机内在特性的限制。要是用雷达或者超声波来成像，计算机容量就会成为一个现实问题，可是地震回声测深的信息含量（频带宽度）正好是大致与当今计算机的容量相匹配。

4. 为何有趣？

许多年轻人似乎都以揪住棘手的理论问题不放为乐事，可是一旦到了需要实际应用的时候，他们往往失望地发现，这个理论在某些方面是离题的，或是不适合于当前的问题。一开始的时候，这会减少对于实际问题的兴趣，但是最终许多人会达到这种境界：把实际问题看成是比原有数学模型更为有兴趣的事。为什么会这样呢？

生活也许是像一种计算机游戏。我曾经注意到，学生们最喜爱的游戏并不是那些具有一种预先决定的内在逻辑结构的游戏，他们喜欢可以允许他们在玩游戏时能逐步揭露其规律的游戏。当由于应用自己个人的一些概念而使游戏老受挫折的时期能够告终，那确实是乐趣无穷的。可是，要成为有趣的事，游戏就必须有若干规律，而你经过相当数量的努力必须能够揭露出它们。很幸运，反射地震学连同现代计算机，就为我们提供了这样一个类似的环境。有时，游戏可能总是失败，这时需要别人给你一点提示，使你克服某些障碍，进入一个新的境界，达到较高的水平。阅读这本书并不像是玩这种游戏，它倒更像是给你题解大全或是锦囊妙计，有助于你达到更高水平。

这些策略妙计大多数是新概念，其中许多概念的形成时间都不超出十年。所以选择它们，是因为它们确实起作用，虽然并不总是、但往往是可令人满意的。我已经抑制了想把许多虽尚未经充分试验但是颇有发展前途的策略妙计包括在内的强烈愿望了。

实践问题不但是比理论问题更深入一层，而且从根本上来说它们还会产生更为有意义的理论。例如，我在大学一年级物理实验室内曾经想根据简单试验导出牛顿定律，我应从实验中发现力等于质量乘加速度，当然，我没发现事实确实就是如此，试验似乎进行得并不顺利，因为还存在有尚未考虑到的摩擦力。对你来说，现在摩擦确实就是一个有趣的主题了。物理学家、化学家、冶金学家、地球科学家，全都了解牛顿定律，但愿他们都懂得摩擦力！

你们现在所拥有的理论书籍，除两种较早期的理论处理方法如：成层介质数学物理理论、时间序列分析之外，都还没有写出，也不可能涉及到我们数据资料中的一些最有趣的方面。有的人认为我们仅仅有涂改玷污的数据！反射地震数据资料是可以重复回放的，我们的问题中有许多实际是从理论产生的，而不是从数据产生的。

5. 计算机与电影

这本书包括有一系列计算机程序，这些程序是用于解说例子和作为练习，也可作参考之用。尽管还不能保证它们是尽善尽美，但是我作这本书中的许多图件时，它们曾起过作用，因而它们应当也能为你服务。你将注意到，这是类似于FORTRAN的一种程序语言，在1.7节开头部分就有这种程序的叙述说明。由于每人备有不同类型的图形输出装置，你自己要想采用这种程序，那你就得精通这类装置，以便能将它们的输出接通至你的绘图设备。

电影实际就是许多画面的集合，在一台计算机中，它只不过就是一种必须以某种方式使之转换为光亮画面（图形元素）的浮点数三维矩阵。目前，少数人已配备有可将这样一种三维矩阵直接转换成电影的设备。在我的实验室中，这种转换是在一种高质量录像计算机终端（AED512）上完成的。电影的潜在能力是一种很有价值的财富，它增强了我们对数据资料的理解和对数据处理的理解。学生们因亲眼见到自己进行的程序工作能立即形成可用录像磁带转录的一部电影，从而大大受到鼓舞。与其它图形显示装置相比，这种装置很容易维修保养，进行研究工作学生和攻读硕士学位课程的研究生都会使用它，利用它作课外作业练习。

包括快速直接存取 (DMA) 计算机接口在内, 这类设备的费用不超过一万美元。就真正有效地采用这类显示方法的经验而言, 你还应当具有可对内存大于几兆字节的一种计算机进行物理控制的手段, 如果你不是已经具备这点, 处理成本费用将会增加大约十倍。

6. 有事可干吗?

反射地震成像方法主要应用于石油勘探。烃类不同于核能, 它是一种非再生能源, 而且还有迹象表明, 在年轻一代有生之年期间, 石油生产一定会下降。这是不是就意味着年轻人应回避研究这方面的问题呢? 我想, 当然不是如此。就长期的观点来看, 随着地球上人口的继续增加, 很难想像人们会失去对地壳进行研究的兴趣; 就较为中期的观点看, 随着能源蕴藏丰富程度的减少, 势必激起更大的勘探能源的努力; 就短期的观点看, 从事能源勘探的工作者在今天是很需要的, 而且现在还不存在以煤或核能为能源的飞机。在任何情况下, 本书所讨论的技巧、物理概念在计算机上的实现方法等, 将始终是具有普遍适用意义的。

7. 本书阅读指南

第一章与第三章阐述反射地震学成像的基本概念。第二章与第四章的内容为分析被观测波所需之计算机方法技术。第五章阐述先进的成像概念。在斯坦福大学, 第一章至第三章是硕士研究生一个学期的讲授课程内容, 在选修根据本书开出的课程之前或之后, 这些学生同时还选修一门根据《地球物理数据处理基础》开出的课程。你也许想不学习有关方法技术就能对概念有所理解, 那就不妨试着只读第一章和第三章内容, 不过, 第二章内容因其具体性质和它所包含的例子, 将会增进你的理解能力, 不妨也读一读。第四章内容适合于那些想了解高质量完成任务时涉及到一些什么问题的技术人员, 或者适合于那些希望通晓各种方法的技巧与精度限制的非常熟练的解释人员。第五章阐述一些新颖的成像概念, 它们在原理上看来是正确的, 但是因各种并非全都能为我所知的的原因, 它们均尚未获得广泛实际应用。容忍得了数学的解释人员也许会赞赏第五章, 因为这一章的宗旨就是解释事情是如何和为什么总是按他们在实践中作的那种方式而完成的, 不过, 对于那些希望去发展新型回声成像方法技术的人, 第五章内容才真正会具有主要的吸引力。

第一章 成像方法概论

1.1 爆炸反射面

脉冲波震源、检波器（有时像个拾音器）和多记录道波形显示系统是反射地震勘探的基本设备。测线沿地表布置，对海上勘探而言，测线可以是指勘探船航道，在这种情形下，接收装置称作水听器。大约每25米震源激发一次，并在附近记录回声。由于穿透地层的地震波波长比勘探船还长，震源和水听器几乎没有什么方向调谐能力，因此，回声可同时从几个方向到达。解释这些观测结果，是地球物理学家和地质学家的共同任务。地球物理学家承担定量的、物理的和统计方面的任务，他们的主要目标（因而也是主要指导写作本书的目标）就是根据这些回声作出有关地层内部的良好图像。

1. 有力的类比

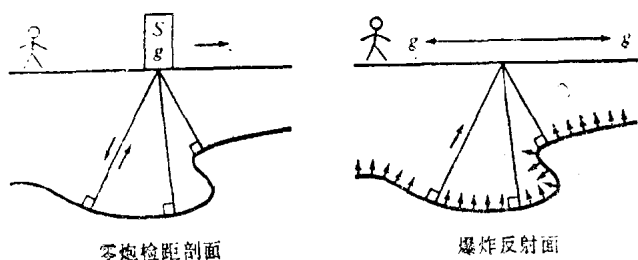


图1.1-1 沿地表面所有位置移动的自激自收方式回声采集（左图），“爆炸反射面”想象模型（右图）

的，把观测的与假设的这两种波场想像成确实是相同的波场，这在概念上有很大的好处。如果它们相同，那么实际完成的成千炮记录就可忽略不计，从而可把注意力只集中于一个假设的记录上。在实际的与想像的这两种情形之间，有一种明显的差异，那就是：在实际野外观测系统中，波必须首先向下传播，然后沿同一路程向上返回地表，而在假设的观测记录中，波只向上传播；前者是双程射线路程，后者是单程射线路程。野外实际观测记录的旅行时间应除以2；在实际工作中，分析野外观测记录资料（双程时间）时都假设波速等于其真值的一半。

2. 惠更斯二次点源

海面的波浪具有可与地震勘探采

图1.1-1所示是两种波动传播情形，第一种情况是实际的野外回声测深方法，第二种情况是一个想象的观测记录情况——地层内的反射面突然同时爆炸激发，从假设的爆炸震源产生的波向上传播至地面，为假设的一组检波器所接收。

在图中要注意，实际野外记录情形下的射线路程看起来同想象的爆炸反射面情形下的那些射线路程是一样的

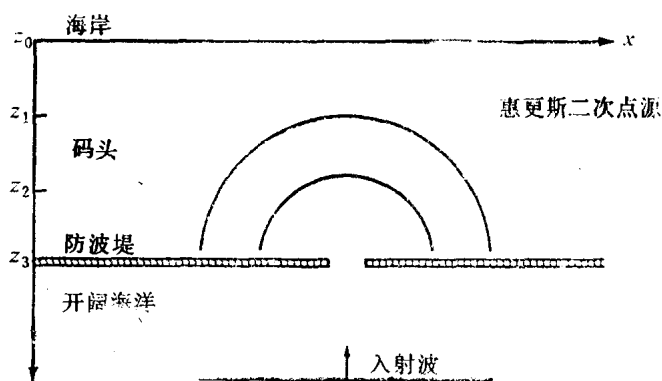


图1.1-2 通过防波堤空隙的波具有半圆形波阵面（波长的长度可与空隙大小相比时）

用的波长相比的波长（15米至500米），不同之处就是海浪移动缓慢，容易观察。假设想像有一很长的平行于海滩的码头防波堤，该堤有一很狭小的入口，恰可容许船只通过。这种情形如图1.1-2所示。来自开阔的公海而入射在防波堤上的平面波将形成一个通过该堤空隙的波。能观察到的一件事实就是：波阵面在码头内部变成为一个以该空隙为圆心的半圆弧。波浪的这种波束与经过窗户射入的光线之间的差别只在于波长与孔穴大小之比值不同而已。

线性性质是所有弱振幅波（不是指近岸处泡沫迸溅的碎浪）的一种性质，这意味着防波堤有两个空隙就要形成两个半圆形波阵面，两圆相交处的波浪高度就等于两个高度的线性相加结果。有趣的是考虑一下一个具有许多洞穴的防波堤，在洞穴非常多这种极限情形下，防波堤消失了，剩下的只不过是一个紧挨着一个的空隙，许多半圆形波阵面形成的仅是入射平面波。双曲线形的时距曲线亦复如此，图1.1-3所示是密度由左至右逐渐增大的许多双曲线，所有非垂直角度方向上的波必然按某方式彼此叠加，使得除该平面波存在之外，其他一切均被压制抵销。

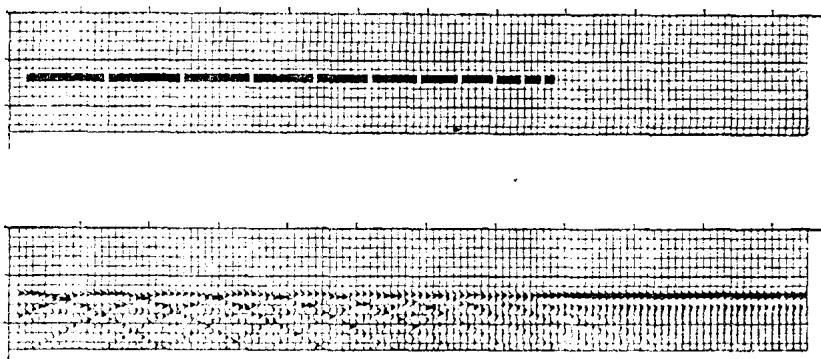


图1.1-3 具有许多洞穴的堤（顶部）及堤外所见到的 (x, t) 空间内的波（底部）

设将直角坐标系置于海面上，使海岸沿 x 轴方向，而 z 轴方向则可测度距海岸的距离。为适合与反射地震学进行类比，假设人们活动只限于海岸（相当于反射地震中的地表面），他们在那里进行波动观测——把波浪的高度作为坐标 x 与时间 t 的函数来加以观测记录。他们根据这种数据可以作出关于在 (x, t) 平面内防波堤上存在有一个向外开口的空隙的推断。图1.1-4(a)所示是波浪从海洋到达海岸的时间，最接近开口处之波浪最先到达，用什么数学表达式来确定 (x, t) 平面内所见到的到达时间曲线形状呢？

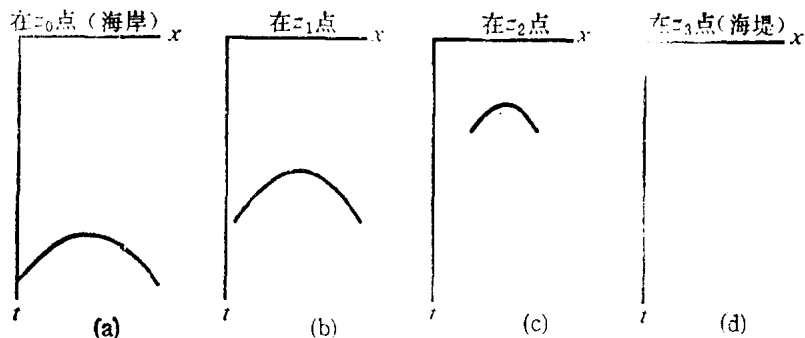


图1.1-4 左端的图表示在海岸上所见波浪之双曲线型时距曲线，右侧各图表示朝向海洋方向的距离增大时，各个相继的到达时间曲线（ x 轴业已压缩，不同于图1.1-2）（据Gonzalez）

波浪是一圈圈不断扩展着的圆。环绕点 (x_0, z_0) 以速度 v 不断扩张的圆其方程为

$$(x-x_0)^2+(z-z_0)^2=v^2t^2 \quad (1.1.1)$$

想像时间 t 为一常数时，即作一个快镜头拍摄时，则式(1.1.1)就是那个圆的方程。设令 z 为常数时，它就是在该 (x, t) 平面内的一个双曲线方程。若在 (t, x, z) 三维体积内考虑，式(1.1.1)就是一个圆锥方程；各种不同 t 值时的横切面表现为各种不同大小的圆；各种不同 z 值时的切片表示为各种不同的双曲线。图1.1-4所示是四种双曲线，自左至右，第一个双曲线是在海岸上 $z_0=0$ 观测到的；第二个是在指向海洋方向的某个距离 z_1 上假想的一组观测结果；第三个是在距海岸更远一些的距离 z_2 上假想的一组观测结果；第四个是在始终都接近于防波堤的距离 z_3 上的一组观测结果，在该种情形下，双曲线业已蜕化为一个点。所有这些双曲线均属于一个双曲线簇，每个双曲线均具有相同的渐近线。该渐近线相应于在开口空隙处转动将近90度角度的一种波，该波沿大约平行于海岸的方向移动着，移动速度即波浪速度 dx/dt （为适合于对这种水波的类比，假定波浪的速度是一个与水深无关的常数）。

如果原始的入射波是个正脉冲，那么，惠更斯二次震源必然应由正极性与负极性二者组成，才能使所有波动因相消干涉而彼此抵销，只有平面波存在。所以，惠更斯二次震源的波形是有相移的。在下一节，将求出惠更斯二次震源的数学表达式。船工水手们熟悉的另一种现象是：惠更斯半圆的最大振幅是位于直接指向海岸的方向上。由防波堤移动至海岸的波浪其振幅衰减至零，在光学中，这种随角度而出现的振幅减弱，称作倾斜因子（obliquity factor）。✓

3. 偏移定义

run这个词，字典可以给出许多定义，它们彼此有关而又彼此有别。在地球物理勘探中，migration（偏移）这个词同样也是大概有四种彼此有关而又彼此有区别的意思，最简单的意思是像move（移动）这个词的意义。当位于 (x, z) 平面内某个位置上的物体在随后时刻 t 时又位于另一个不同的位置上，于是我们就说它移动了。类似地，当位于地球物理观测 (x, t) 空间内某个位置上的波至（往往也称作同相轴），又可在较大的深度 z 上出现在不同测线的不同位置上，于是我们就说它偏移了。

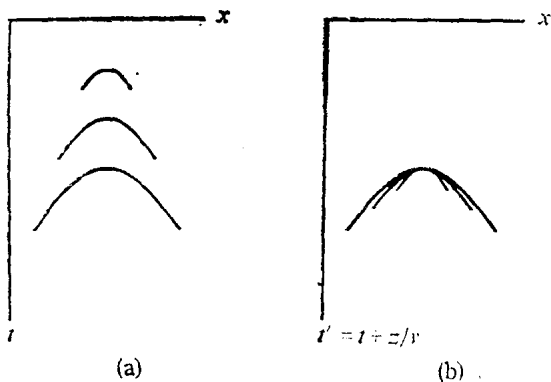


图1.1-5 (a)表示图1.1-4中诸双曲线的叠合，(b)表示对叠合再配合以称作延迟 $t' = t + z/v$ 的时移，使双曲线顶部彼此重叠（据Gonzalez）

为更清楚看出这点，试想像图1.1-4是取自一部影片的几个镜头画面。在影片放映时，深度 z 就开始从海岸位置的深度（地表面）一直改变到防波堤位置的深度。把这些镜头画面叠合到一起，则如图1.1-5(a)所示。电影中发生的现象主要是同相轴朝 $t=0$ 方向向上偏移了。要消除这种占主导地位的垂直转移的影响，使各双曲线的顶点都保持在相同位置上进行另一种形式的叠加。从数学上说，这就是用所谓的延迟时间轴 $t' = t + z/v$ 来代替时间轴 t ，如图1.1-5(b)所示。

第二种定义，也即更为准确的偏移定义是：在 (x, t') 空间中的同相轴随深度 z 之改变而发生的移动，在消除垂直时移之后，还有残余

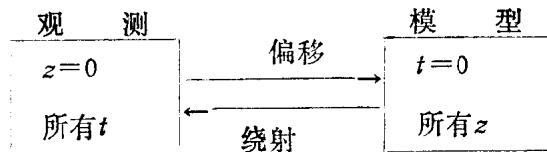
时间移动，那就主要是由某种波形变化引起的了。按照这种定义，双曲线顶点或者水平地层是不偏移的。

图1.1-5中的双曲线实际上是延伸至无限远的，但是图中每一个双曲线都在某个时间上截断，这个时间等于 $\sqrt{2}$ 乘该双曲线顶点的的时间，所以图中所示双曲线仅是描述在与垂直方向呈45度角的的范围之内的射线。务必记住这一点：双曲线极小值时间与任何其它到达时间的比值等于传播角度的余弦值。每个双曲线都是截止于45°出射角的射线。注意，图形上各双曲线的端点可用一条直线联起来，还有，各双曲线端点上的斜率均相同，对于任何波阵面，波的传播角度在物理空间内为 $\tan\theta = dx/dz$ ；对于任何地震同相轴，当你设想波阵面以角度 θ 与地面相交时，你就会发现，斜率 vdt/dx 就等于 $\sin\theta$ 。所以，在物理空间 (x, z) 内沿一直线移动的能量就沿数据空间 (x, t) 内的一条直线而偏移。随 z 之增大，沿所有角度传播的能量就一起聚集在一焦点上，这个焦点位于爆炸反射面，它就是防波堤内的开口空隙。这就是偏移的第三种定义，即，偏移即是以某种方式将观测数据——作为 x 与 t 之函数的波浪高度——从海岸延展至防波堤的过程。这第三种定义并不过分强调移动本身，而是强调自起点至终点时的变换。

为更深入一步理解，只靠防波堤的例子是不行的，需要有更具普遍性的例子。防波堤的例子局限于仅在某个特定深度 z 上形成惠更斯二次震源，但是为解释偏移的意义，还需要有在其他各种深度上的二次源。为此，现在提出一种可移动数据使 z 值不断增大的波场外推过程，按照下式构制爆炸反射面映像：

$$\text{映像}(x, z) = \text{波场}(t=0, x, z) \quad (1.1.2)$$

这第四种偏移定义还与偏移的反义词，即绕射的定义有联系：



有时把绕射看作是形成与扩展双曲面的自然过程，偏移则是完成其反过程的计算机处理。

在第三章中将出现使用偏移一词的另一种情形，在该章中，水平坐标可以是炮点与检波点之间的中点 y ，或者是炮检距 h 。在 (y, t) 平面和 (h, t) 平面内全都可以将双曲面向下延拓，在 (y, t) 平面内，这种向下延拓称作偏移或成像，而在 (h, t) 平面内则将它称作聚焦或速度分析。

4. 数据资料中的脉冲

惠更斯绕射在 (x, z) 空间内呈孤立的脉冲函数（即 δ 函数）形式，从而 $z=0$ 时在 (x, t) 空间内就可使它成为一支双曲线。逆过程则需从 $z=0$ 时在 (x, t) 空间内的一个 δ 函数开始。这种倒过来的过程可以想像成是属于这样一类地震勘测：除了在一个特定位置上能记录到回声之外，在任何其他位置上均记录不到，而在该特定位置上记录到的又仅只是一个回声。同这样的观测结果符合一致的应该是什么样的地层模型呢？如图1.1-6所示，这种地层必须包含有一个球形反射面，球心就位于那个奇妙的记录位置上。

自然过程会在地层内部形成许多球形反射面，这看来是未必可能的。但是当我们注意业经处理过的地球物理资料时，往往可看到剖面上有那么一些球形反射面。显然，这类输入数据中包含有一些与此处所解释的波动传播理论不尽符合一致的脉冲。这点说明，为什么石油

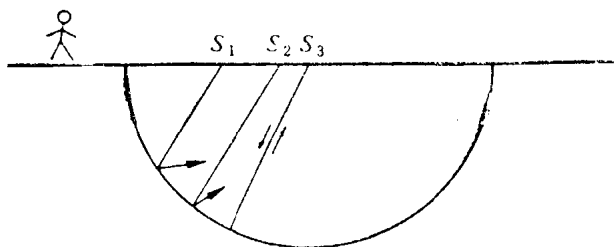


图 1.1-6 当地震震源 S 准确位于半圆形反射面的圆心时，那时且仅仅在那时，才会有一个回声反射至位于震源点上的检波器

这种半圆形反射面是根据仅只在地面一个位置上记录到一个回声这种数据记录方式作出的逻辑推论

置 (x_m, t_m) 。设想有一平面波阵面与地表面呈夹角 θ ，在时间 dt 内传播距离为 dx ，假设速度为 v ，我们就得出以可观测测量表示的波动传播角度

$$\sin\theta = \frac{vdt}{dx} = pv \quad (1.1.3)$$

垂直旅行路程因

$$t_m = t_0 \cos\theta = t_0 \sqrt{1 - p^2 v^2} \quad (1.1.4a)$$

而小于有角度倾斜时的路程。由旅行时间 t_0 及速度水平分量 $v \sin\theta$ 得出偏移之后的横向位置为

$$x_m = x_0 - t_0 v \sin\theta = x_0 - t_0 p v^2 \quad (1.1.4b)$$

考虑到双曲线是向其顶点作偏移，就会明白为什么式(1.1.4b)中包含有一负号。式(1.1.4a)与式(1.1.4b)是反射地震资料人工偏移的基本方程，它们告诉你偏移至何点，但是它们并未告诉你斜率 p 会如何变化。

6. 反射面变陡

设有一垂直分界面，这是倾斜地层的一种极限情形，它的反射，即双曲线的一支渐近线，却具有非垂直的陡度，这证实偏移将使倾斜地层的视陡度增大。我采用视陡度一词，是因为它是在 (x, t) 平面内所看到的已经变陡了的地层之斜率。偏移结果实际是沿 z 轴方向分布的，但是为形成偏移时间剖面，总是使 z/v 重合在 t 轴上。当我们说一个双曲线偏移至其顶点时，我们考虑的当然是偏移时间剖面。让我们将变陡过程作为一个角度函数来加以研究一下。

设原点 (x_0, t_0) 邻近有一点 $(x_{0+}, t_{0+}) = x_0 + \Delta, t_0 + p\Delta$ ，根据方程(1.1.4)，这个邻域偏移至

$$t_{m+} = (t_0 + p\Delta) \sqrt{1 - p^2 v^2} \quad (1.1.5a)$$

$$x_{m+} = x_0 + \Delta - (t_0 + p\Delta) p v^2 \quad (1.1.5b)$$

现在我们可以计算出偏移之后的同相轴因倾斜而形成的斜率 p_m 为

$$p_m = \frac{dt_{m+}}{dx_{m+}} = \frac{dt_{m+}/d\Delta}{dx_{m+}/d\Delta} = \frac{p}{\sqrt{1 - p^2 v^2}} = \frac{\tan\theta}{v} \quad (1.1.6)$$

所以，像直角坐标空间内的斜率一样，偏移时间剖面上的斜率暗示着倾斜角度的正切，而未偏移的时间剖面上的斜率则是该角度的正弦。

倾斜层在偏移时有斜率变化，而双曲线的两翼在向下延拓时却未改变斜率，这事看起来

勘探人员即使他们个人并不打算编写什么处理程序，可他们却不得不研究反射地震数据处理方法。要理解认识原始数据资料，那太复杂了。经过处理的资料可以给出一个地层模型，但是它的可靠性难以断定。你也许从未打算去造一辆汽车，但是当你独自驾车远行进入沙漠时，那还是谨慎一点好，应该尽你所能去了解熟悉关于汽车的知识才是。

5. 手工偏移

已知在点 (x_0, t_0) 上的地震同相轴其斜率为 $p = dt/dx$ ，试确定偏移后之位置

似乎有点自相矛盾，其实不然。一个原因是偏移等于向下延拓再加上成像（选择 $t=0$ 时）；另一个原因则是一个双曲线是在一个深度上由一个震源所形成的一种特殊同相轴，而倾斜层却是由不同深度的许多点震源之叠加结果所形成。图1.1-7即是表明形成一线状反射面的许多点如何由绕射形成为一线形反射，以及形成一线形反射的许多点是如何偏移至一线状反射面的。

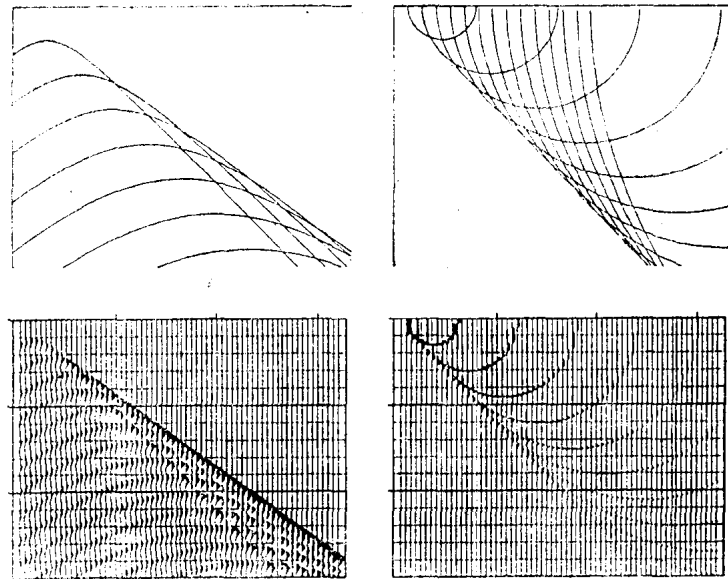


图 1.1-7

左图是许多双曲线的叠加结果。各支双曲线之顶部沿一条直线分布，该直线就像是反射面，不过并不是一条连续直线，而是一系列的点。相长干涉形成一个向一侧倾斜的视反射

右图表示许多半圆的叠加结果。各个半圆的底部沿一条直线分布，该直线代表观测到的平面波。不是平面波分解成一系列反射到达点，而是现在要把每个反射点解释成来自一个半圆状反射镜面。把所有反射镜面加起来，就形成了一个陡倾斜反射面

7. 爆炸反射面概念的限制

爆炸反射面概念是有力而又巧合的类比。对于全部时间是从事于解释而不是从事于处理的人来说，将爆炸反射面概念喻之为必不可少的拐棍还不够，它还是仅有的运输工具！可是，对于我们这些从事于数据处理的人来说，这个爆炸反射面概念却有一个严重的缺点，现在还没有一个人已经解决了如何把这概念推广应用于非零炮检距记录资料的问题，然而，大多数资料却都是以相当大的炮检距进行记录的。在现代海上地震勘探中，不是用一个水听器，而是成百个串接在一条电缆上，拖在船后。记录系统的电缆长度典型的是二至三公里，勘探钻井可达三公里左右的深度，所以，实际上，地层倾角可以很大。这就涉及到新问题和新机会了，不过所有这些要到第三章才会讨论。

再者，即使是零炮检距记录，这个爆炸反射面概念在定量上也不正确。该概念能有效成立的范围，将在第三章中阐述，此刻只对三个明显缺点作些注释：图1.1-8所示是无法用爆炸反射面模型加以预测的射线，这类射线在零炮检距剖面中却会出现。为适应这种情况，就只得假设存在有速度横向变化。

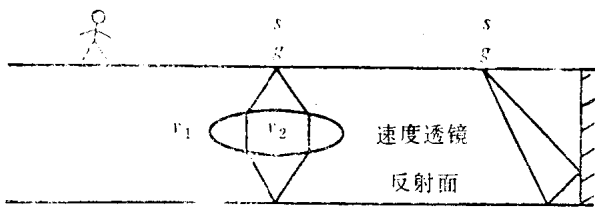


图1.1-8 爆炸反射面模型解释不了的两支射线，
然而零炮检距剖面上却可能存在这种射线

其次，爆炸反射面概念无法解释多次反射。设有双程旅行时间为 t_1 的一个平缓海底，由海底形成的多次反射应在时间 $2t_1$ 、 $3t_1$ 、 $4t_1$ ……等可预测到，而按照该爆炸反射面概念来解释，则第一次的多次反射应该从反射面至海面然后由海面至反射面，再从反射面至海面，总时间为 $3t_1$ ，从而相继的多次反射应在时间 $5t_1$ 、 $7t_1$ ……

时出现。由此可知，零炮检距剖面上产生的多次反射不同于爆炸反射面模型产生的那些多次反射。

我们能够看到波从分界面的两侧发生反射，这就涉及到爆炸反射面模型的第三个缺点，爆炸反射面模型预言由两侧出射的波具有相同极性，而根据反射系数的物理意义则只能说相反两侧所形成的反射应具有相反极性。

8. 板块构造例子

板块构造理论认为，洋底是由海洋中部附近的脊火山上所形成的薄板块构成的，这些板块向海洋最深部的海槽移动，在那里它们倾没重返地壳。对该理论最有利的证据就是洋底缺失古老的岩石，一般而言，大陆都是被较年轻的移动海洋板块所推挤碰撞的古老岩石。有很多种方法可以极容易地观察到洋中脊火山作用形成的板块建造，至于板块是否真正在海槽中碰撞那就无法观测如此清晰了。证据均来自天然震源位置和反射地震学，图1.1-9所示是

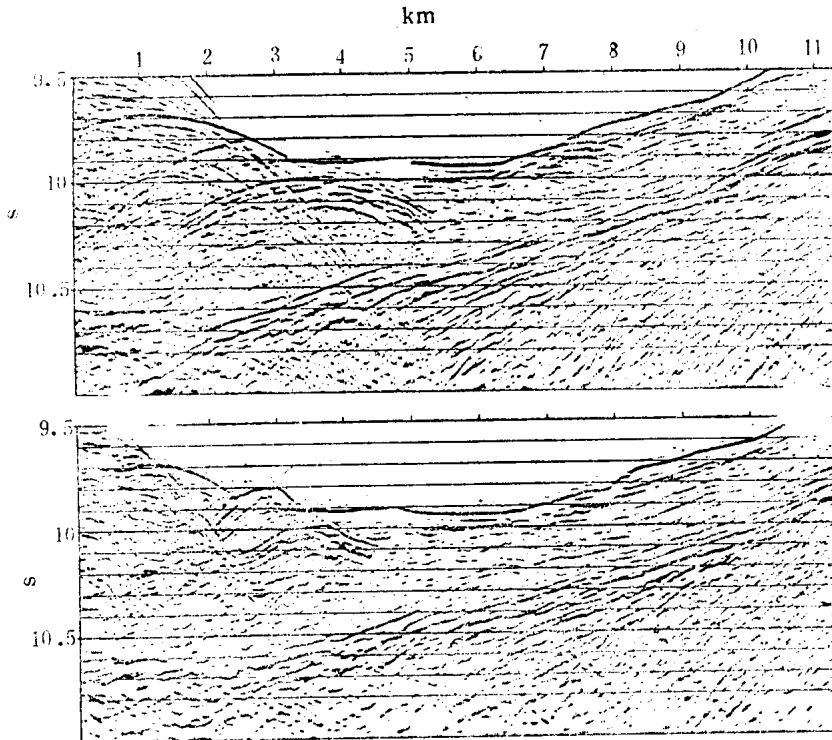


图1.1-9 上图是通过日本海槽的一条11公里长的测线的反射资料（东京大学海洋学研究所）；
下图所示为偏移处理之后的结果（Ottolini）