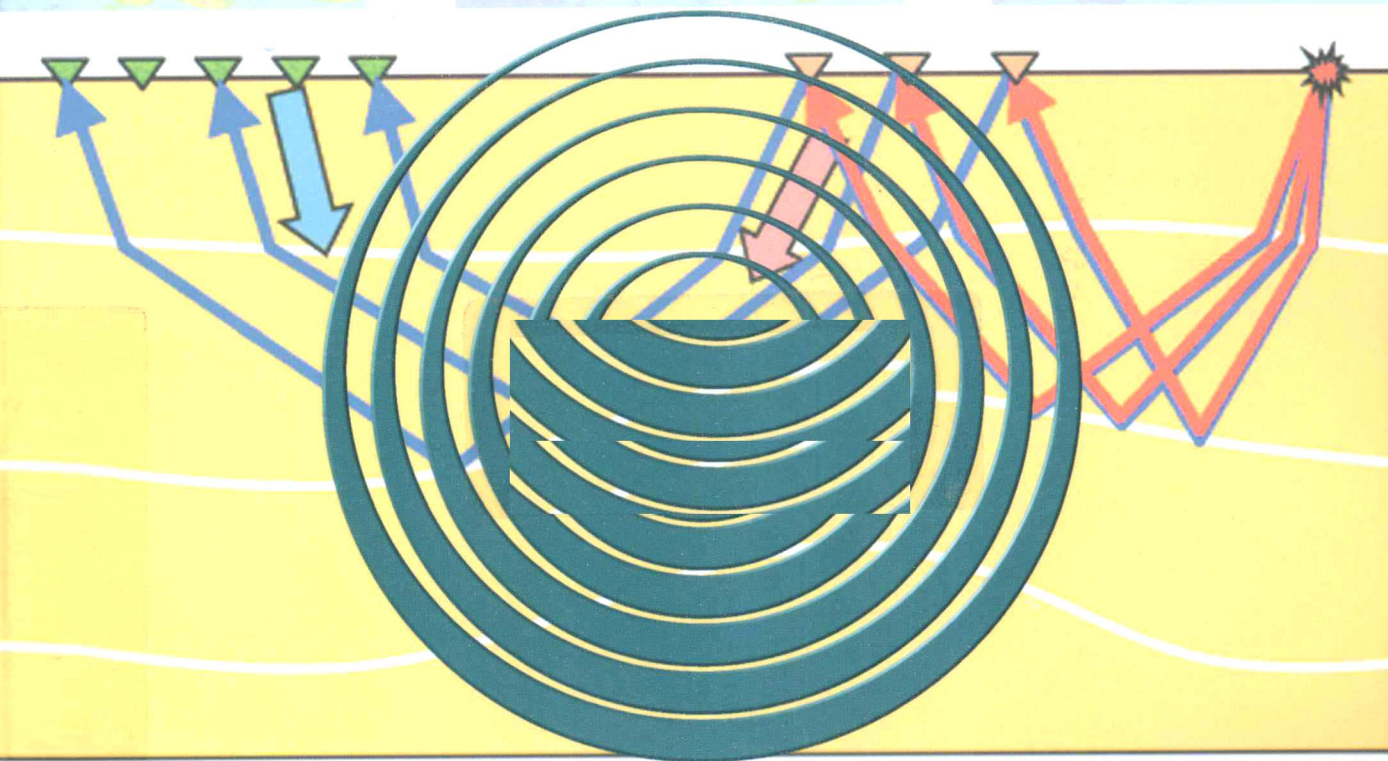


地震多次波去除技术的 过去、现在和未来

〔荷〕 D. J. Verschuur 著
陈浩林 张保庆 刘 军 全海燕 等译
曹孟起 李国发 周 辉 刘原英 等校



石油工业出版社

地震多次波去除技术的 过去、现在和未来

[荷] D. J. Verschuur 著

陈浩林 张保庆 刘 军 全海燕 等译
曹孟起 李国发 周 辉 刘原英 等校

石油工业出版社

内 容 提 要

该书系统地总结了地震多次波的去除技术,集成了多年来地表相关多次波去除的研究成果,是一本关于地震勘探中多次波去除技术的专著。

本书可供地震数据处理人员和地震采集设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震多次波去除技术的过去、现在和未来/(荷)弗斯丘尔(Verschuuer, D.J.)著;陈浩林等译. —北京:石油工业出版社, 2010.12

Seismic Multiple Removal Techniques: Past, Present and Future
ISBN 978-7-5021-8143-7

I. 地…

II. ①弗… ②陈…

III. 地震勘探-研究

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 234976 号

本书经 EAGE Publications BV 授权翻译出版,中文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 01-2010-2481

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

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12

字数:310 千字

定价:98.00 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

《地震多次波去除技术的过去、现在和未来》

译校人员名单

陈浩林	张保庆	刘 军	全海燕
曹孟起	李国发	周 辉	刘原英
叶苑权	刘占族	罗敏学	牛宏轩
张洪军	李晓东	倪成洲	袁学东
郭 毅	邵玉海	刘庆格	苏庆莹



译者的话

在反射波地震勘探中,多次波是重要的干扰波之一。对于海上地震勘探,由于海面、海底两个强波阻抗界面的存在,多次波尤其发育。多次波的存在不仅给地震数据成像处理带来问题,同时,如果地震数据成像处理过程中对多次波处理不当,还会给后续地震资料解释带来一系列问题。长期以来,为有效地压制或去除地震数据中的多次波,人们根据不同类型多次波的特点,发展了多种去除多次波的方法。

D.J. Verschuur 先生长期从事多次波去除的理论方法和应用技术研究,从 1988 年开始,陆续在 EAGE、SEG 发表了多篇有关去除多次波的文章。D.J. Verschuur 先生尤其在地表相关多次波的去除 (SRME) 方面有非常深入的研究,发表了多篇专题文章。《地震多次波去除技术的过去、现在和未来》是 D.J. Verschuur 先生对目前多次波去除方法的系统总结,同时集成了多年来地表相关多次波去除 (SRME) 的研究成果。本书共分 10 章,包括“多次波的问题、基于时差和倾角差异的去除多次波方法、预测反褶积、波场延拓法去除多次波、去除地表相关多次波 (SRME) 原理、去除地表相关多次波 (SRME) 方法所面临的现实问题、预测多次波的自适应减去方法、面向 3D 的多次波去除技术、层间多次波的去除技术、多次波的利用”等。

本书是一本关于地震勘探多次波去除技术的专著,可以作为从事多次波去除技术、方法研究和地震数据处理人员的参考书,同时也可以作为地震采集设计人员的参考书。

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海上勘探事业部陈浩林总工程师组织翻译,由东方地球物理勘探有限责任公司海上勘探事业部、研究院大港分院、国际勘探事业部深海业务经理部等单位共同完成。第 1 章以叶苑权为主翻译,第 2 章和第 3 章以陈浩林为主翻译,第 4 章以全海燕为主翻译,第 5 章至第 9 章以张保庆、刘占族为主翻译,序言、致谢和第 10 章以刘军、刘原英为主翻译。曹孟起、李国发、邵玉海等为本书翻译校对做了大量细致的工作。同时罗敏学、牛宏轩、张洪军、李晓东、倪成洲、袁学东、郭毅等也参与了本书的部分翻译工作。最后陈浩林、刘军、刘原英对全书进行了校对统稿。由于译者专业知识所限,翻译过程中虽然已尽可能地将专业术语统一,并尽可能地将原作者思想表述清楚,但仍可能存在与原作者理解和表述上的偏差,造成译文的歧义,恭请读者批评指正。

译者

2010 年 10 月



前言

当我第一次用合成记录展示二维地表相关多次波的去除 (2D SRME) 结果时, 一些人告诉我这项技术将永远不会在野外数据上得到应用。当我第一次展示去除地表相关多次波后的野外数据结果时, 人们认为结果很好, 但这种算法太昂贵, 因此不可能成为实用方法。10 年后, 地表相关的多次波去除技术已经成熟, 并成为多次波去除方法中先进的工具之一。可以说, 现今的 2D SRME 技术基本上成为商业化软件。在 1997 年的 SEG 年会上, 有关多次波去除的研讨有个类似的现象, 人们争议全 3D SRME 将永远不可行, 理由是海上三维地震数据采集的观测系统不允许以真三维的方式构建多次波。10 年后, 一些人已经给出了处理全三维多次波问题的方法, 因此, 期望再过 10 年 3D SRME 也将成为商业化软件, 同时可能包含在海上数据的船载处理系统中。回顾历史得到的经验是, 工作在新技术前沿的人们永远不必担心诸如计算能力或采样率等“细节”限制, 因为这些“细节”问题将在不断的发展中得到解决。

本书可用于多次波去除方法的 EAGE 课程讲座, 并且提供了适当的有助于理解课程内容的背景资料。我已设法使数学方面的内容尽可能地简单, 有需要的地方, 我努力用简洁的方法描述并提供图解实例。从我个人的观点看, 重要的不是数学公式本身, 而是隐藏在其后的推理。此外, 我尽力更多地强调特定过程的物理意义而不是严谨的数学推导, 这些推导可从列出的参考资料查到。

本书对行业中已经发展的去除多次波的多种方法进行了综述, 然而这其中关于与地表相关多次波去除方法 (SRME) 发展的内容远多于任何其他方法, 我甚至没有去平衡其他各种方法的篇幅, 因此本书偏向于 SRME 技术和该技术涉及的多种问题的解决。此外, 该书并非尽善尽美。过去的半个世纪中, 发展了如此众多令人感兴趣的多次波去除概念, 其中一些在我写书过程中才刚刚发现, 因此很难在有限的篇幅中包含这些内容。但是, 我尽可能着重给出各种去除多次波方法之间的联系, 以增加对这些方法理解。

我很高兴写这个讲稿, 同时我真诚希望这个讲稿能展示出其主题。

Eric Verschuur

2006 年 7 月于 Delft



致谢

本书虽然以我的名字为作者，但是本书包含了许多人的工作成果。尽管本书的大部分实例确实是由我自己完成的，但多数情况下是受到了他人工作成果的启迪。

首先，我想感谢 A.J.(Guus) Berkhout 教授，正是他为了我的博士学位论文邀请我从事多次波去除课题的研究并在该课题研究中发展了如此众多的概念：从最初的 SRME 概念出发，接着是多次波反射成像，然后为了从多次波中建立一次波，将该方法延伸到层间多次波去除并重新定义了该理论为焦点变换理论。他用铅笔和纸张工作，我用计算机工作，我们合作得就像一个金色团队。他从那时起直到现在依然不时地会提出新的想法能使我们一直忙上好几年。同时，我想感谢他建立了一个研究协会，目前称为德尔福 (Delphi)，由多于 25 家与石油天然气行业相关的公司赞助。如果没有这个研究环境，这些想法将不会像现在这样找到进入地球物理行业的途径。

其次，我想感谢我现任“老板”Dries Gisolf 教授，我们进行了关于地震成像和反演方面的许多讨论，这些讨论的确拓宽了我的视野和思维，增加了我的科学知识。尽管他参与多次波去除方法研究不多，但是这些讨论有助于我在对某些特定问题的解决上借鉴其他论题和方法。

参加德尔福国际研究协会，使我能够幸会本行业的许多人。协会的许多交流，包括从咖啡休息期间的点滴闲谈到两个月的访问，扩展了我的视野，并且给我注入了许多想法。

我想要提及的还有 Panos Kelamis，他几乎每年都邀请我访问沙特 Aramco 公司，无论是科学考察还是个人交往都非常愉快。我们一起研究了许多数据集，他以极大的热情帮助我获得了许多陆上数据处理的经验。在像沙特 Aramco 这样的一家大公司中，我了解了公司是怎样经营的以及日常工作中人们互相沟通的重要性。和解释人员交谈，改变了我如何观察地震数据的观念。当我以能够去除一些剖面的大量多次波而自豪时，他们却常常仅对围绕目标区 50ms 的时窗感兴趣。不但要从整体上看数据，而且要从局部上看数据，这是我从中学到的。我也非常喜欢与沙特 Aramco 的其他人一起工作，我要提及的人有 Kevin Erickson, Roy Burnstad, Bob Clark，以及我们目前来自沙特 Aramco 的博士生 Muhammad Al-Bannagi 和 Mustafa Al-Ali。

接下来，我要感谢 Mohamed Hadidi，我们长期在多次波去除的领域合作。当 1996 年 Mohamed 访问我们的研究小组时，我们开展了关于海洋数据集中与边界相关的层间多次波去除技术的首次应用工作。从那时起，我和他一起完成了几个海上和陆上数据多次波去除项目。我还为 Exxon Mobil 工作过一周，很高兴地与 Warren Ross、Anatoly Baumstein，以



及研究组的其他成员一起合作。

此外，感谢 Roald van Borselen 在开发三维 SRME 和层间多次波去除方面给我们的支持：帮助选择三维 SRME 试验需要的合适的数据集，多次参与讨论有关这方面问题和其他相关问题，并总能带来有益的帮助。另外，听到一些来自服务公司方面的“故事”也很高兴。

Riaz Alai 是德尔福 (Delphi) 的校友，现工作在 Anadarko，感谢他在我的研究过程中不间断地提供各种数据的样本。研究陆上和海上带有各种各样多次波问题的不同数据体，有益于增加我对油公司日常所遇到问题的体会。我们的许多讨论已经成为他们方法新发展的途径，而有时这种快速但却不太干净（去除多次波）的新发明的方法在工作中的确有效。

与家人一起应邀作较长时间的停留有助于我享受各种环境，在 Tony Nekut 和 Walter Rietveld 关照下有了在 Tulsa 的 Amoco 停留两个月的美好时光。Tony 对地表相关多次波理论一丝不苟的追求使我意识到这样一个事实——在急于进行下一个应用之前，坐下来并审视到目前为止我到底发现了什么是非常有用的。最近，对“竞争对手”斯坦福勘探项目组一个月的访问，也拓宽了我的科学视野，看到另一个研究小组以完全不同的形式进行工作，使我确信在生活中不单只有一个真理。特别感谢 Biondo Biondi 公司。

更进一步，我要感谢几个业界的同事。Helmut Jakubowicz 和我有过多多次有益的讨论，他会不时地给出使我好奇的新思想。Neil Hargreaves 和我也有过一些有益的讨论，即在本书中第 7 章提到的多道集自适应减去法。特别是在层间多次波去除方面的合作。本书中，与 Ken Matson 和 Art Weglein 的共同讨论对我更好地理解逆散射路经问题是最大的帮助。最后，我不得不承认，基于散射路经去除层间多次波，不需知道地下界面的确切模型！还要感谢 Tury Taner 对于解决地球物理问题的持久的热情和有益的建议。

作为一个不断发展变化的研究小组的指导教师，我有机会和年轻的有才华的科学家以及科学同僚在一起工作。本书中的多次波去除方面，Ewoud van Dedem 应用 SRME 于三维数据，对于 3D SRME 是一个巨大的进步。另外，他的稀疏反演软件帮助我产生出第 2 章中高分辨率双曲 Radon 变换的例子。和 Nurul Kabir 一起工作，帮助我学习了抛物线 Radon 变换和它在多次波去除中的应用。还有，自从 Nurul 开发了 Radon 插值工具后，它已经成了近偏移距插值的主要选择。几个博士生写的软件用在 Delphi 的系统中，也间接地为本书作出了贡献。我特别地想提及 Jan Thorbecke 和 Alexander Koek，他们写了很多有关处理、成像和波场传播的软件，大学生 Gert Jan van Groenestijn 最近所做的焦点变换工作帮我保持警醒，因为有时他的一些思想我认为我早就应该有。我还要感谢 Remco Romijn 帮助我处理了几个野外数据集。什么时候我有了新的野外数据集，他总是第一个读数据并做一些初步的处理，使这些数据可随时为我所用。他的细致和及时的工作方式有时和我混乱的行为形成



鲜明的对比。我还要感谢 Arno Volker 和 Gerrit Blacquiere, 我在第 8 章中用到了他们的水槽中的二维数据采集工作。此外, 不能忘记 Edo Bergsma 和 Herny den Bok en Paul Keekstra 默默无闻的工作, 他们总是在计算机和软件方面有出现问题时出现。

我还要感谢 Felix Herrmann, 他是 Delft 大学我们小组的校友, 现在他在英国哥伦比亚大学有他自己的研究小组。我们关于曲波域减去法去多次波方面的合作取得了一些好的效果 (见第 7 章)。我相信曲波域或类似的多维变换会对地震数据处理和成像算法拓展冗余性方面有很大的帮助。

下面, 我还要感谢几家公司, 感谢他们友好地提供一些用于测试我们算法的野外数据。用野外数据测试确实有助于我们评估新方法的优点和不足, 同时还能给你提供需要解决的新问题。首先要感谢 Saga 石油公司, 目前为 Norsk Hydro 的一部分, 感谢该公司为我提供两块北海的数据集。我还感谢 Exxon Mobil 和 Erik Neuman, 感谢这两家公司为我提供了在第 1 章和第 5 章中所使用的 Nordkapp 数据集。Western-Geco 做了一个杰出的选择, 给我提供了密西西比峡谷数据集用在 1997 年 SEG 会议上, 从那以后, 这个数据集成为检测多次波去除算法的著名的基准数据集之一。还有 BHP 提供的展示在第 1 章中的数据集, 同时也在 1997 年 SEG 的讲座中使用过。Total 公司提供了来自苏格兰近海很难处理的数据集, 我现在用在第 8 章中作为三维问题的例证。通过沙特 Aramco 公司, 使我有机会解决陆上数据各种各样的多次波和成像问题, 对此深表谢意。还要感谢 PGS 和 Norske Chevron 公司, 提供了用于 3D SRME 测试并被 Ewoud van Dedem 在研究中使用的数据集 (见第 8 章)。更进一步, 感谢 PGS 的 Roald van Borselen, 他允许我在第 8 章最后使用了他们巴西近海数据的结果。最后, 感谢 SMAART JV 公司在业界中推动了二维和三维 SRME 的应用, 以及为大家提供 Sigsbee 2B 数据集和向 Delft 大学捐赠 Ziggy 物理模型。

感谢 Art Weglein 和 Bill Dragoset, 他们编辑了 SEG 上非常好的有关多次波衰减的小册子, 有这些重要的参考资料在手, 我可以免于在成堆的杂志中寻找或下载大量的 PDF 文件。

感谢 EAGE, 使我有信心成为最近发展的 EAGE 巡回教育项目的第一个指导教师, 感谢他们把我的手稿印刷成书所做的奉献, 同时感谢他们在我巡回报告中所做的全部后勤工作。

感谢近 20 年以来所有德尔福 (Delphi) 的赞助者, 他们的支持对于我们目前所取得的成果非常重要。还要感谢 Delft 大学允许我完成此书和让我参加巡回教育旅行。

最后感谢我的妻子 Margreet, 除了她帮助我组织这本书的参考书外, 我要特别感谢她给我经常忙乱的生活带来的一些平衡。



1 多次波的问题	1
1.1 引言	1
1.2 多次波的类别	2
1.3 多次波的特征	6
1.4 对地震成像和地震解释的影响	9
1.5 多次波去除方法的分类	10
1.6 本书概要	11
2 基于时差和倾角差异的去除多次波方法	13
2.1 引言	13
2.2 基于时差差异去除多次波的基本原理	13
2.3 f - k 变换和拉冬变换	15
2.4 f - k 域或拉冬域滤波去除多次波	22
2.5 抛物线拉冬域多次波压制	24
2.6 高分辨拉冬变换的发展方向	26
2.7 利用时差差异进行多次波压制的局限性	29
2.8 面向目标的倾角滤波去除多次波方法	32
3 预测反褶积	35
3.1 引言	35
3.2 褶积与相关的概念	35
3.3 利用最小二乘法设计适应滤波器	39
3.4 预测反褶积基础	43
3.5 扩展预测反褶积概念	47
4 波场延拓法去除多次波	55
4.1 引言	55
4.2 波场正向延拓和波场反向延拓	55



4.3	波场延拓法预测多次波	62
4.4	在波数域和线性拉冬域的应用	68
5	去除地表相关多次波 (SRME) 原理	71
5.1	引言	71
5.2	一维 SRME 算法推导	72
5.3	二维和三维 SRME 方法	78
5.4	SRME 自适应算法	81
5.5	SRME 的迭代实现	83
5.6	多次波预测与去除法之间的关系	88
6	去除地表相关多次波 (SRME) 方法所面临的现实问题	90
6.1	引言	90
6.2	数据缺失对 SRME 的影响	90
6.3	浅水多次波去除策略	100
6.4	陆地资料去除多次波	101
6.5	在不同数据域应用 SRME	105
7	预测多次波的自适应减去方法	109
7.1	引言	109
7.2	最小平方减去策略	109
7.3	其他多次波减去技术	119
8	面向 3D 的多次波去除技术	126
8.1	引言	126
8.2	复杂 3D 环境中的多次波	126
8.3	3D SRME——理论	132
8.4	3D SRME——数据内插解决方案	135
9	层间多次波的去除技术	143
9.1	引言	143
9.2	利用时差差异来去除层间多次波	144



9.3 扩展 SRME 方法至层间多次波	144
9.4 逆散射级数层间多次波去除技术	148
9.5 与层有关的层间多次波去除	151
9.6 面向 CMP 以及叠后压制多次波的策略	154
10 多次波的利用	159
10.1 引言	159
10.2 将多次波包含在偏移处理过程中	159
10.3 将多次波包含在反演处理过程中	164
10.4 将多次波转换为一次波	165
10.5 多次波也许会成为我们的“朋友”	170
参考文献	171

1 多次波的问题

1.1 引言

反射波地震勘探通常是指在近地表激发地震波，通过地面埋置的检波器来接收非均质地层反射波的勘探方法。地震波成像的目标就是将地表接收到的反射波反向归位至产生它的地层界面上的反射点，并由此得到地下反射特征。多数地震波成像算法是基于所有散射能量在地下界面仅反射一次的假定（如图 1.1 黄线所示）。然而实际上，每个地下反射体或散射体对于上行波和下行波来说并没有区别。换句话说，声波在向地表返回的过程中将经过浅层非均匀介质，形成二次下行散射能量，其结果是多次波反射的出现，多次波反射可能最终在地面检波点处结束（如图 1.1 蓝线所示）。多次反射波通常被视为噪声并从地震数据中去除，以免在之后的地震资料解释中造成误解。这项工作在地震数据处理阶段通过专门的进程来完成，一般称之为多次波去除或多次波压制方法。

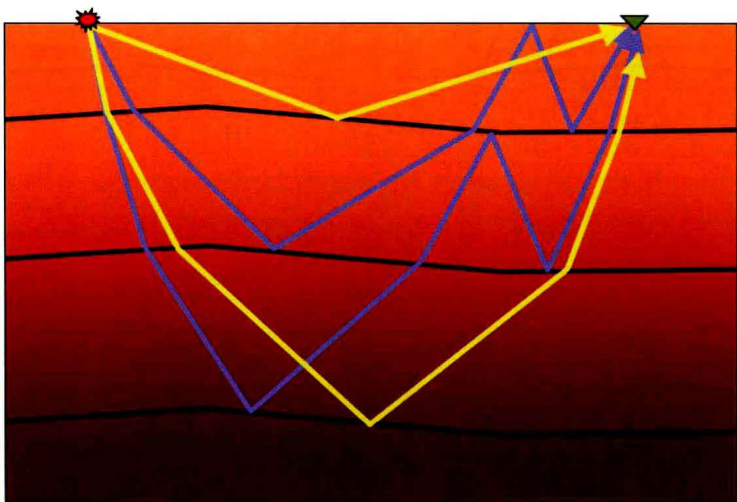


图 1.1 一次波在地下界面只有一次上行反射（黄线），而多次波在地下界面至少有一次下行反射（蓝线）

本书将讨论现今最为常用的去除多次波方法。在介绍这些方法之前，让我们首先认真分析一下这些出现在地震数据中的多次波、多次波的类别以及如何从地震数据中去识别多次波。

1.2 多次波的类别

多次波的分类方法有好几种。首先我们考虑产生多次波反射最浅的下行反射界面的情况。图 1.2a 画出了两个多次波路径，第一个多次波在地表下的第一个反射界面有一个下行反射，我们称之为与第一个反射界面有关的层间多次波（就海上而言，这个反射界面为海底）。图 1.2a 中的第二个多次波路径在不同的反射界面有两个下行反射：一个在地表，另一个在第二个反射界面。我们会将第二种多次反射与产生下行反射最浅的界面联系起来，所以在这种情况下称之为与地表有关的多次波。有了这种认识，与地表相关的多次波可以这样定义，如果地表对于声波能量变得通透时将不复存在的多次波（如图 1.2b 所示）。对于层间多次波，只有当所有的上覆反射界面对于声波能量变得通透时，这类多次波才不存在。图 1.3 中的第一个多次波是与地表有关的多次波，而第二个多次波是与水底有关的层间多次波，只有当地表和水底不发生反射时，这两个多次波才会消失。

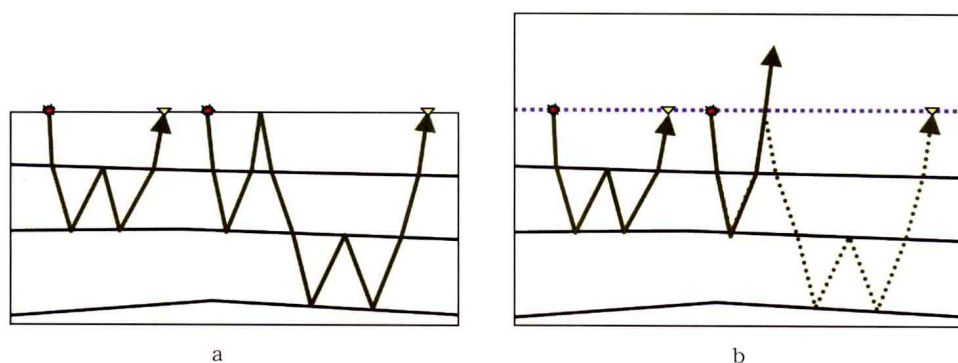


图 1.2 地表反射情况和地表通透情况下的多次波路径
a—两种类型的多次波；b—当地表通透时，与地表有关的多次波消失

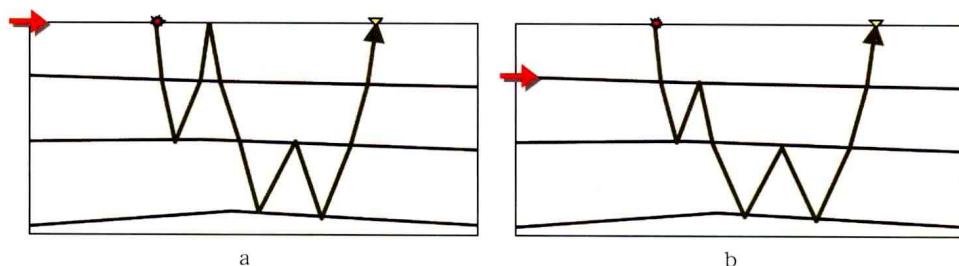


图 1.3 根据最浅的反射边界对多次波进行分类
a—与地表有关的多次波；b—与水底有关的层间多次波

有些去除多次波的方法仅适合于某种特定类型的多次波，因此有必要将与地表有关的多次波进一步分类。图 1.4a, b, c 分别展示的是三种与地表有关的多次波，为方便起见，假设第一层为水层。图 1.4a 所示的多次波称之为水底多次波，它没有向水层以下的地层传播，只在水层内上下传播。图 1.4b 所示的多次波称之为水柱混响，它在水底之下的地层只反射一次，而在水中则来回反射。这类鸣震的水中多次反射既可以发生在震源一侧，也可以发生在检波点一侧，或两侧同时发生。图 1.4c 展示的多次波在水底之下的地层经历了两次或两次以上的反射，这类多次波没有特定的名字，暂且称之为“其他与地表有关的多次波”，当水底以下存在诸如盐层顶部之类的强反射界面时，这类多次波会相当重要。当多次波带有两个或两个以上次水底反射且在水中也经历了多次鸣震时，这类多次波既可以归类到水柱混响，也可以归类为“其他与地表有关的多次波”，为了与前面的定义保持一致，一般还是将这类多次波称为鸣震（如果有的话），因为这是表层相关多次波的最浅层部分。最后，在地表界面没有下行反射的多次波称为层间多次波（如图 1.4d 所示）。

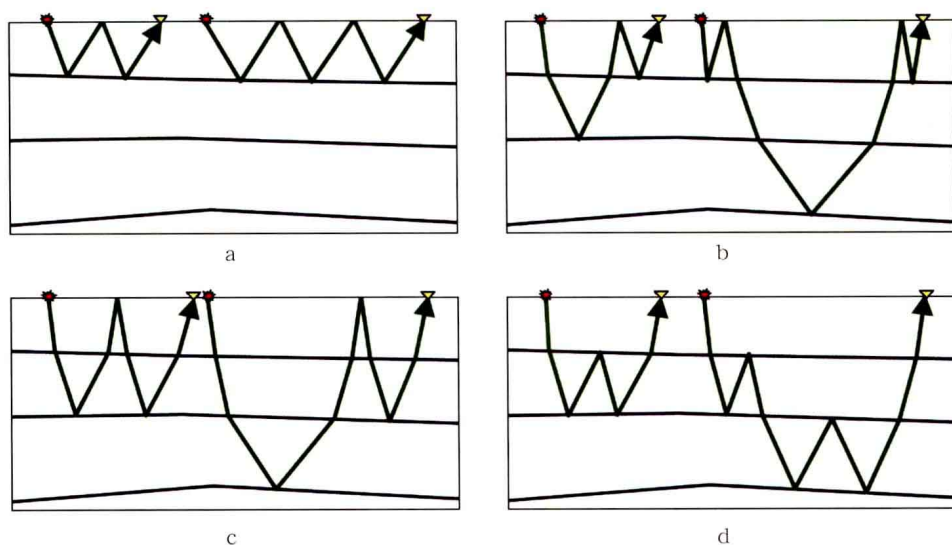


图 1.4 不同类型的多次波

a—第一层内的多次波，多次波在第一层中来回反射；b—第一层内的多次波/微屈多次波，多次波在第一层中至少来回一次；c—其他与地表有关的多次波，但在第一层中无反射；d—层间多次波。

注意，图 a, b, c 都是与地表有关的多次波

图 1.5 显示挪威最北部的 Nordkapp 工区内的一条 2D 海洋地震测线的叠加剖面。这条测线穿过两个盐丘（分别位于叠加剖面上 CMP900 和 CMP2400 的位置），由于海底相当平坦，海水层多次波呈水平同相轴，并穿越海底之下的地质构造（如图 1.5 橙色箭头所指）。水柱混响以“鬼波”的形式并以几乎固定的时间周期出现在每个反射之后（如图 1.5 红色箭头所示）。海底之下存在反射较强的地层，这些地层产生的与地表有关的多次波称之为“其他与地表有关的多次波”（如图 1.5 蓝色箭头所示）。由于一次反射有一定的倾角，这类

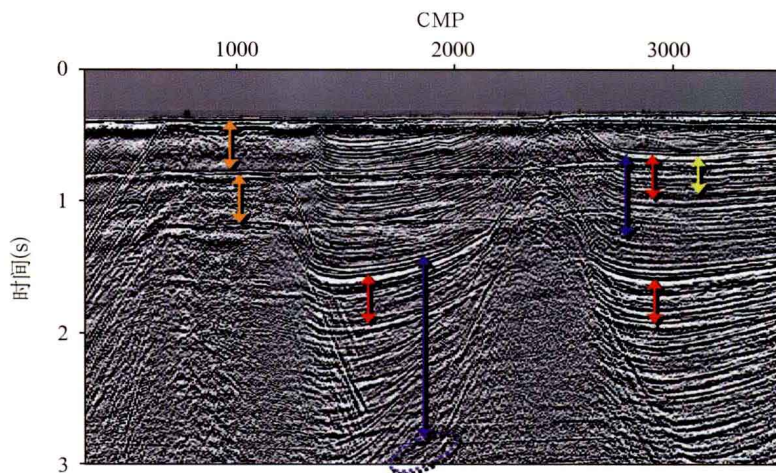


图 1.5 挪威最北部 Nordkapp 地区的一条海上地震测线叠加剖面上不同种类的多重波（经 Exxon Mobil 许可）

橙色箭头指示水层多次波；红色箭头指示水层鸣震；蓝色箭头指示与水层无关的地表相关多次波；黄色箭头指示（可能的）层间多次波

多次波的倾角大致为一次反射倾角的两倍，这一点可以作为识别这类多次波的标志。最后，在叠加剖面右边 CMP3000 附近，在海底和强反射之间，可以看到层间多次波（如图 1.5 黄色箭头所示）。不过，由于所示位置同相轴之间的相互干涉，我们并不能确定层间多次波确实可见。

除了基于产生多次波的反射界面对其进行分类之外，多次波还可以分为长周期多次波和短周期多次波。长周期多次波为那些多次波同相轴可分解为一次波射线路径的多次波，这些路径总是具有双程旅行时，在地震数据中观察到的是不同的波至。换句话说，长周期多次波由于其具有分离的同相轴，即更具确定性的表现特征，在地震数据中能够识别（如图 1.6a 所示）。另一方面，短周期多次波为那些观察不到与产生它的一次反射分离的同相轴的多次波，它们与薄层干涉有关（如图 1.6b 所示），更具统计效应。在薄层的情况下，所

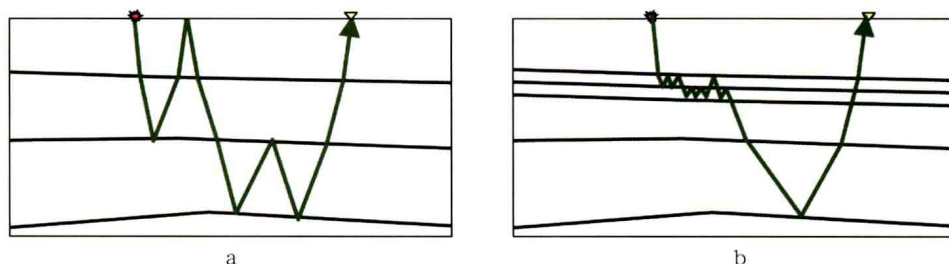


图 1.6 多次波可根据周期的长度进行分类

a—长周期多次波。这种情况下的多次波与产生它的一次波有明显不同的到达时间，称之为长周期多次波，它们具有确定性的表现特征；b—短周期多次波。这种情况下薄层产生的短周期多次波会与一次反射相互干涉，称为短周期多次波。

短周期多次波表现了更多的统计效应；许多薄层的层间多次波通过叠加可以构成有效的传播效应

有的层间多次波与一次反射波一起构成一个有效反射同相轴，在这里观察到的子波与一次波的子波形态不同，O' Doherty 和 Anstey (1971) 研究了这种影响。实际上，多次反射贡献了最终透射能量的大部分，但也造成了散射效应和声波能量的整体延迟，这就是我们经常提到的地层滤波效应。

图 1.7 展示了薄层情况下层间多次波的影响。该模型由 1m 厚的一系列薄层构成，介质的速度为 2000m/s 的常速，但薄层的密度随机变化，在薄层之下设置了一个强反射界面用于观测这组薄层对地震波传播的影响。图 1.7a 是这个模型的密度曲线。图 1.7b 是不考虑多次波的情况下产生的单炮合成记录，图 1.7c 是包含所有层间多次波的情况下产生的单炮合

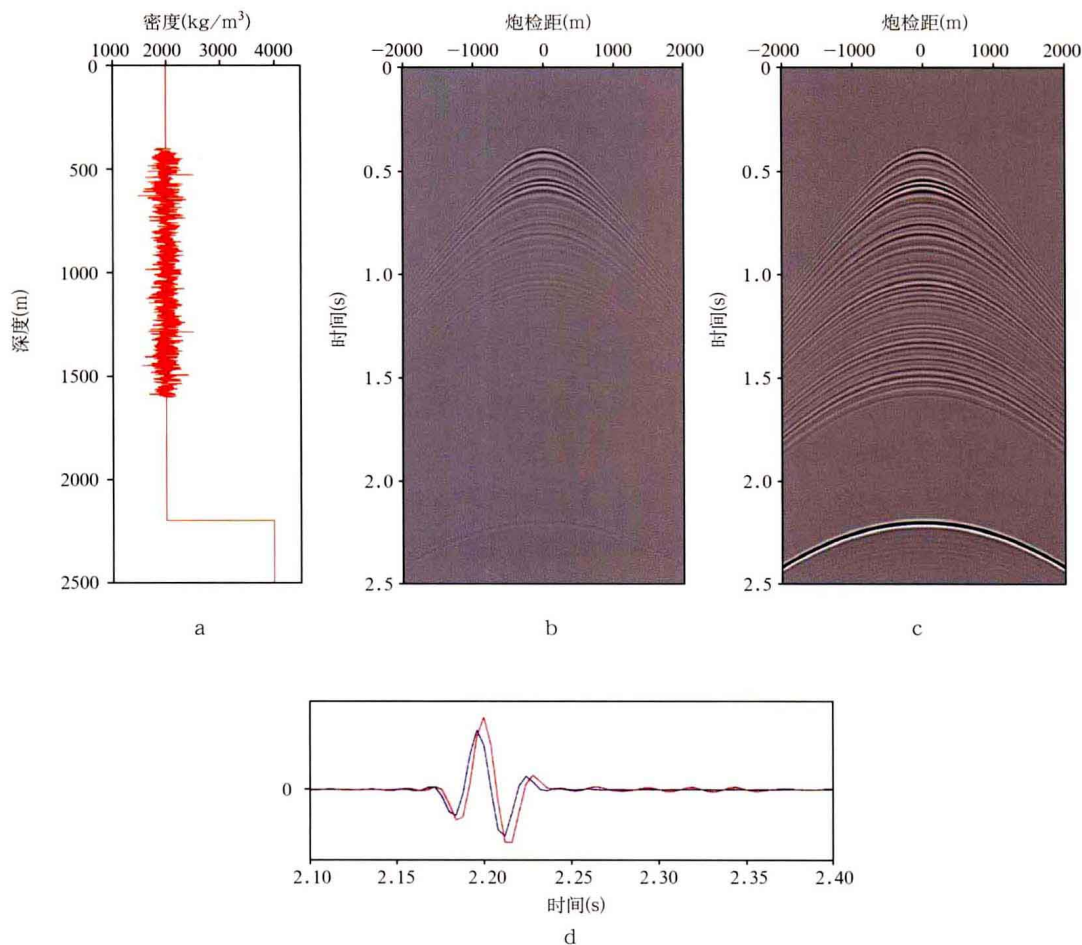


图 1.7 薄层对地震波传播的影响

图 a 为密度剖面图，显示了速度为 2000m/s 的常速水平介质中带有密度差异，图中的薄层组是由多个 1m 厚的密度随机变化的薄层构成，另外在 2200m 处存在一个较强的反射界面。图 b 和图 c 是基于这个速度和密度模型计算的地震反射响应记录。图 b 没考虑层间多次波的影响，图 c 考虑了层间多次波，计算时没有考虑与地表有关的多次波；图 d) 是深层反射同相轴的局部放大显示，其中蓝线是没有考虑层间多次波影响的波至（振幅放大 20 倍），红线是考虑层间多次波情况下的波至，注意多次波造成的波至时移