

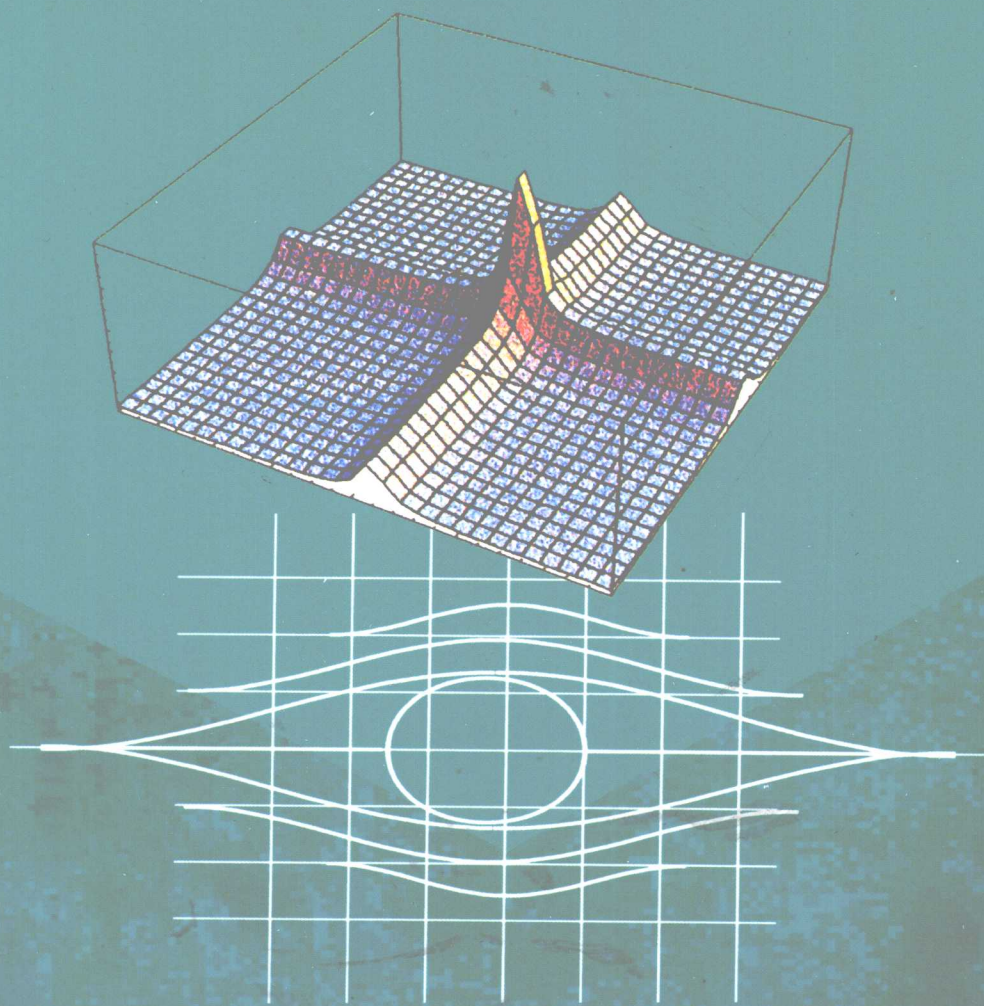
3-D Seismic Survey Design

三维地震勘探设计

〔美〕 Gijb J.O. Vermeer 著

李培明 何永清 译

牛毓荃 校



三维地震勘探设计

[美] Gijs J. O. Vermeer 著

李培明 何永清 译

牛毓荃 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书涵盖了三维地震勘探设计从数据采集到叠前偏移的全过程,具体内容包括地震波场的连续采样和对称采样理论及实例,阐述了勘探设计的各种观点和准则。本书可作为地震勘探设计人员、地震资料处理人员、解释人员及地震勘探研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

三维地震勘探设计/[美] 弗米尔 (Vermeer, G. J. O.) 著;
李培明, 何永清译. —北京: 石油工业出版社, 2008. 10

书名原文: 3-D Seismic Survey Design

ISBN 978-7-5021-6733-2

I. 三…

II. ①弗… ②李… ③何

III. 三维地震法勘探

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 120286 号

Copyright © 2002 by the Society of Exploration Geophysicists

All rights reserved. This book or parts hereof may not be reproduced in any form without permission in writing from the publisher.

本书经 SEG 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 01-2008-3356

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) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14.75 插页: 4

字数: 380 千字 印数: 1—2000 册

定价: 58.00 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

1996年,俞寿朋先生等翻译了Andreas Cordsen、John W. Peirce著的《陆上三维地震勘探的设计与施工》一书,对促进我国的三维地震勘探起到了很大的作用。随着油田勘探开发的不断深入,三维地震勘探起着越来越重要的作用。特别是近年来,由于三维精细勘探的不断发展,原来的基于地震波运动学的三维设计已不能适应三维勘探技术的进步。三维勘探设计的优劣将直接决定三维勘探的质量及其勘探效果。为使读者更多地了解基于地震波动力学特征的三维勘探设计的基本原理,提高三维地震勘探设计的水平,我们翻译了Gijs J. O. Vermeer的3-D Seismic Survey Design一书,希望能有助于我国精细三维地震勘探工作的深入开展。

Gijs J. O. Vermeer先生在20世纪80年代就开始三维地震勘探设计理论的研究。从20世纪90年代初开始,我们就不断地看到他在设计方面很有见地的文章与著作。本书几乎涵盖了三维勘探设计的全过程,最重要的是阐述了地震波场的连续采样和对称采样理论。本书共分10章,包括二维对称采样、三维对称采样、噪声压制、陆上三维观测系统设计准则、拖缆和固定检波器的对比、转换波属性与三维勘探设计、三维对称采样实例、影响空间分辨率的因素、倾角时差校正,以及叠前偏移等。

本书既可以指导地震采集技术人员设计与优化三维地震勘探的观测系统、指导处理人员正确地选择处理方法和参数、解释人员正确地使用三维地震资料,同时,也可以作为从事地震勘探研究人员的参考书。

本书第1章和第2章以何永清为主翻译,第3章至第10章以李培明为主翻译。最后由牛毓荃教授进行了全书的校对和统稿。由于一些专业术语并没有完全统一,同时也可能存在与原作者理解上的偏差,翻译的内容难免会出现异议。如果读者发现不妥之处,欢迎批评指正。为了方便读者参照原文,本书还提供了关键名词的中英文对照,供读者参阅。本书得以出版,首先要感谢东方地球物理勘探有限责任公司领导及其科技发展部、采集技术支持部、敦煌经理部领导的大力支持,同时也要感谢SEG和中国石油学会石油物探专业委员会的热情帮助。

译者

2008年10月

序 言

任何技术的发展都是先有不同水平的文章报道，随后才有权威性的著作面世。我在这里很自豪地介绍的正是这样一部三维地震勘探设计的权威性著作。

在早期三维地震技术实现之前，有不少关于地震勘探设计的文章和讨论。那时，差不多每个施工专家都有自己所偏爱的震源或检波器组合方式或两者兼而有之，并且希望深入探讨它们各自的优点。勘探设计不仅是二维的，而且还受到仪器等因素的制约，并且存在着普遍的问题——波场采样不足。

大体上，因为像 Nigel Anstey、Leo Ongkiehong 和 Henry Askin 等已在他们的“走向通用的地震采集技术”和“地滚波究竟怎么了”等文章中对二维采样有足够的阐述，所以，这方面的文章数量逐渐地减少了。

在 20 世纪 80 年代中期，三维采样方法的应用发展得很快。我们再一次经历了专家们对于海上和陆上勘探（特别是对于后者）各自所喜欢的设计及其不同观点的激增期。对一些人来说，唯一切实可行的排列方式是“砖墙”式，而对另一些人来讲则是窄线束式。可以看到，有些设计中相邻地下测线的静校正量计算是相互独立的；有的设计为了追求完美而对野外队有些不合理的要求，比如要求大量接收组合相互叠置，从而导致重复交叉；在某些情况下，采集人员不与数据处理人员沟通，以至于后者不得不恳求前者不要使用他们目前偏爱的新奇设计！与 Anstey、Ongkiehong 和 Askin 以前的有关二维采样方面的文章一样，我们只需要对三维采样存在的问题和解决方案给出一个清楚而正确的阐述。

Gijs J. O. Vermeer 是最有资格填补这个空白并且写书的人，而你现在所拥有的就正是这样一本书。他的学术背景是物理和数学，他不仅是理论家，而且拥有作为处理员和解释员的实践经验。

他的早期文章大部分都是壳牌石油公司（Shell）的内部资料，但是，的确很幸运，从 20 世纪 90 年代初开始，我们已经能在文献里看到不断增加的 Gijs 的著作。1990 年，他的第一部主要作品《地震波场采样》出版了，这本书很快就成为我们书架上的必备书。从那以后，他的《三维对称采样》等若干文章都展现了他的研究方向。更幸运的是，他最近一直致力于这一课题，并且，在 Delft 大学攻读博士学位。我推荐的这本书就是他的研究成果。在书中你将会完整地了解关于三维地震勘探设计的基本原理，以及一些常见的实际问题。如像经常破坏三维数据体的“采集脚印”问题，由于现在对油藏地球物理学日益重视，这些问题尤其重要。

总之，该书不仅涵盖了陆上和海上勘探，而且也包含有海底电缆、垂直电缆和转换波资料。阐述了勘探设计的各种观点和准则，包括了从采集到叠前深度处理的全过程。它既可以作为教科书又可以作为普通的参考书，勘探设计者、数据处理员、解释员以及学术界和工业界的地球科学工作者都可从中受益。

BP 公司 Ian Jack

致 谢

在很大程度上，这本书是笔者多年来在壳牌（Shell）激励环境中的研究成果。1991年，笔者加入了“三维地震数据采集基本原理”项目，与 Justus Rozemond 一起在以前二维对称采样工作的基础上发展了三维对称采样理论。主要见解是在第一年建立的，但是后来得到继续充实并提高，而且，我们获得了在实践中检验这些想法的机会。

要提及所有对本书各个方面作出贡献的同事，确实是不可能的，但是笔者的确很感谢他们的帮助，必须特别地提到他们中的一些人。在 1996 年以前的大部分研究时间内，Kees Hornman 一直是笔者的上司，后来他也还一直是笔者主要的探讨伙伴；Shell 作业公司的顾问 Jerry Davis 告诉笔者理论可以应用到实践中去；不管什么时候碰到技术问题，Peter van der Sman 都会找出时间来解答；从 1999 年初开始，Rick Stocker 就一直告诉笔者，把理论与实践相结合并不是那么容易的。

非常感激 Bill Kiel，是他使笔者能在 1997 年较早地从 Shell 退休并创办了 3D SymSam（三维对称采样）地球物理咨询公司。他使笔者在与 Shell 公司保持着良好关系的同时，又能把更多的时间投入到地球物理研究和这本书上，这种良好关系还表现在 Shell 公司允许笔者在这本书中展示它们许多的数据实例。

本书中的水平切片都是地震成像软件有限公司用 Omni 工作室的原版制成的。非常感激 TNO 允许把原版的“采集设计向导”放入这本书的光盘中。

笔者还要向 Jacob Fokkema 和 Kees Wapenaar 表示谢意，是他们欣然同意作为这本“博士版”书的审定人。在本书所有工作完成后，笔者很幸运地得到了编辑 Craig Beasley 提出的许多有用建议和仅有的一点善意批评。笔者非常高兴能同 Jerry Henry、Judy Hastings 和 Ted Bakamjian 一起工作，使“博士版”书成为 SEG 地球物理参考系列丛书中的一个新成员。笔者还要向 Ian Jack 致谢，是他非常乐意地写了措辞肯定的序言。

最后，笔者还要感谢妻子 Tini，是她悉心校订了原稿中的英文文法。

前 言

三维地震勘探已经成为一种油气勘探开发中的主要工具。最初的几块三维地震勘探数据是在 20 世纪 70 年代后期采集的，但是，直到 90 年代初期它们才被整个工业界所广泛接受。在这之前，都使用二维地震勘探进行地质成图。

直到 20 世纪 80 年代后期才发表了有关二维地震的最佳采样理论，相关著作包括 Anstey、Ongkiehong 和 Askin，以及 Vermeer 发表的著作。这些理论都是基于下面的观点：炮检距构成了第三维，必须给出关于这一维的采样准则。

早期的三维勘探严重地受技术条件的制约。逐渐地，可供使用的地震道数增加了，这就导致了关于“什么构成一个好的三维采集观测系统”的讨论。普遍的做法是将二维地震采集知识推广到三维。这种方法导致过多地强调 CMP 道集（或面元）的特性，这是因为 CMP 道集中好的炮检距分布是二维设计的一个主要准则。三维设计方法的开发主要致力于面元属性分析，尤其是在炮检距采样方面（规则性、有效覆盖次数、方位角分布等）。

由于不完全了解三维地震勘探中可使用的许多观测系统属性的差异，使这种常规三维勘探设计方法受到限制。尤其是没有适当地考虑最佳叠前成像对采样的要求。本书论述了这些问题，并且为三维地震勘探设计提供了一种新方法。

在本书中所使用的方法和笔者在 1990 年出版的关于二维地震勘探设计《地震波场采样》一书中所使用的方法相同。在论述采样问题之前，必须很好地了解待采样的连续波场。在二维采集中，只需要研究由时间坐标 t 和两个空间坐标（炮点坐标 x_s 和检波点坐标 x_r ）组成的三维波场即可；在三维采集中，叠前波场是五维的，需再加两个空间坐标，即炮点坐标 y_s 和检波点坐标 y_r 。

在实践中，并不是叠前波场的所有 4 个空间坐标都可以被合理地采样的（合理采样的定义是能可靠地重建地下连续波场的采样技术）。取而代之的是，可以定义五维叠前波场的三维子集，而这些子集是可以合理采样的。实际上，二维地震测线只是这些三维子集的一个特例。

二维地震测线是一种多次覆盖数据集，其“中心点”仅在一条线上。而在三维采集中有许多可能的三维子集，它们是单次覆盖的，而且它们的“中心点”可以分布在某个范围之内，这些子集被称之为“最小数据集”。这一术语是由 Trilochan Padhi 于 1989 年在 Shell 的内部报告中首先使用的。一个最小数据集代表照明了地下一部分的数据体（有时称为三维数据体）。如果没有噪声，单独一个最小数据集就足以建立所照明到的地下地质体的一幅图像。

实际使用的大部分观测系统所产生的数据都可以看成是最小数据集采样的集合。因此，为了总体上更好地理解采集观测系统，应该研究最小数据集的特性。这样可以优化观测系统的选择（观测系统的类型通常受经济条件和环境的限制）和观测系统的参数。

待采样的连续波场可以简化成所选观测系统特有的最小数据集波场。对这种波场的合理采样意味着在五维叠前波场的 4 个空间坐标中至少有两个应该是被合理采样的。其次，要使每个最小数据集的有用范围达到最大。这两个建议合在一起就保证了在整个数据集中空间不连续性为最小。空间连续性最大化，最小数据集的偏移假象就最小。每个采集观测系统的其

他参数都需要选择，以便满足分辨率、噪声压制和照明的要求。

本书根据这些基本原理广泛地论述了各类问题。下面简要介绍每一章的主要内容。

第1章对二维对称采样做了简短的综述，这是二维勘探最佳采样的一个处方。二维对称采样理论是以互换原理的推论为基础的，即认为共检波点道集和共炮点道集的特性是相同的。因此，对炮点和检波点的采样要求也是等同的。

第2章介绍三维对称采样。三维地震采集可用许多不同的采集观测系统完成，最重要的有面积观测系统、平行观测系统和正交观测系统。每一种观测系统都有它特有的三维基本子集。如果基本子集是单次覆盖的，那么它也是一个最小数据集。在面积观测系统中，无论炮点或是检波点都可以分布在密集的面积网格中。如果炮点是密集的则检波点是稀疏的，反之亦然。在第一种情况下，可获得三维共接收点道集。这些道集就构成了这个特定面积观测系统的基本子集或最小数据集。

平行观测系统和正交观测系统是直线型观测系统的例子，其炮点和检波点是沿着或宽或窄间隔的直线布设的。在平行观测系统中，炮点线和接收线是相互平行的；在正交观测系统中，炮点线和接收线是相互垂直的。平行观测系统的基本子集是“中心点线”，即炮点线和其有效接收线的中间线。正交观测系统的基本子集是一个“十字排列”，它包含了一条接收线段上的所有检波点，这些检波点用来接收在单独一段炮点线上所有炮点激发的信号。十字排列是具有有限范围的最小数据集。各种采集观测系统的特性的差异，可以通过这些观测系统的基本子集对于同一绕射点的绕射旅行时曲面的差异来说明。

在认识到每种观测系统都存在基本子集之后，二维对称采样理论就可以很容易地扩展到三维对称采样。

对于成像来说，理想情况就是拥有遍布整个探区的单次覆盖数据集，但是实际这些数据集存在空间不连续性，这样就产生了偏移假象，要使偏移假象最少，则数据的空间不连续性就要最小，这种具有最小空间不连续性的数据集就叫做准最小数据集。并且可以由炮检距向量片构成。在正交观测系统中，炮检距向量片的大小是由相邻两条炮点线和相邻两条接收线之间的面积所决定的。十字排列可以分裂成 M 个不相交的炮检距向量片（ M 是覆盖次数），其中炮检距向量的 x 和 y 分量在有限的范围内变化。

第3章介绍噪声压制。三维采集中的采样间隔通常很大以至产生假频，为了减小假频效应，可以使用炮、检组合，可以是线性的也可以是面积的。为了合理地选择组合方式，需要知道噪声的特性。分析低速散射的能量分布表明，十字排列中大部分噪声能量集中在旅行时曲面的翼部，而在顶点附近能量很少。线性组合足以压制翼部的能量。如果有相当多来自各个不同方向的噪声能量，可以使用具有圆形响应的圆形组合。

通常，三维勘探设计的目标之一是得到规则的炮检距分布。这是以Nigel Anstey关于二维数据的叠加组合法为依据的，其观点是：通过对每个CMP道集的炮检距进行规则采样，可以在叠加中使地滚波得到最好的压制。然而，这需要高覆盖的地震资料；如果地震资料是低覆盖的，则随机的炮检距分布往往会有更好的叠加响应。这一现象在覆盖次数偏低的三维资料，尤其是个别方位范围采集的三维数据中特别常见。宽方位正交观测系统（最大横向炮检距接近于最大纵向炮检距）往往在每个CMP道集上产生不规则的炮检距采样，因此往往比窄方位观测系统有更好的叠加响应。

第4章介绍陆上三维观测系统设计准则。本书第1章的理论探讨和结论是观测系统选择和正交观测系统参数选择的应用指南。平行观测系统看起来很像二维采集，叠加响应也是相

似的，并且处理中也可以使用针对二维处理研发出的许多技术，它不适合于分析与方位有关的效应。在海上拖缆作业中，平行观测系统可以进行高效采集，但是在陆地上，平行观测系统的效率不如正交观测系统的高。正交观测系统适用于分析与方位有关的效应。通过使用海底电缆，正交观测系统也能用于海底采集。正交观测系统的处理要比平行观测系统的处理复杂得多。锯齿形观测系统是为在沙漠环境下进行高效采集而设计的观测系统。斜交观测系统与正交观测系统相类似，但是其激发线与接收线是斜交的。与正交观测系统相比，锯齿形观测系统和斜交观测系统的基本子集不适合于双域处理。面积观测系统同样适合于分析与方位有关的效应，它主要应用在要使用非常昂贵的检波设备的深水中，如垂直水中检波器电缆和4-C检波设备（3分量检波器加水检波器）。

正交观测系统的主要参数有道距、线间距、最大纵向与横向炮检距以及覆盖次数，这些参数的选择必须满足空间连续性、分辨率、最浅和最深目的层成图，以及噪声压制的要求。由于偏移算子半径和覆盖次数递减带的存在，勘探面积总是要大于所要成图的面积。

在实际应用中，近似于正方形模板的单线滚动效率可能会相当低。如果不考虑理想的采集观测系统，应用全线束滚动通常会更高效。多线滚动同样会比较有效，但是会产生很大的空间不连续性。

障碍物通常会妨碍使用直线进行采集，而空间连续性要求采集测线是平滑的。通常按道距的整数倍把炮点向左或向右移动，然而会在检波点道集中产生能导致偏移假象的不连续性。对正交观测系统和平行观测系统采集的一般要求是检波点道集要和炮集一样好。

第5章介绍拖缆和固定检波器的对比。在海上地震资料采集中，设计者必须在拖缆系统和固定检波器系统之间进行选择。如果使用拖缆，则使用的是多震源多拖缆排列形式的平行观测系统；如果使用固定检波器系统，则在观测系统的选择上有一定的灵活性。在没有任何障碍物的深水情况下，拖缆是最有效的。采集船只的相邻航次应使用逆平行方式，以便使照明的不规则性最小。然而，由差异羽状漂移所引起的照明不规则性是不可避免的。使用固定检波器系统的地震采集往往比使用拖缆的更为昂贵，使用的系统有垂直水中检波器电缆、海底电缆和节点。节点是一些单独的4-C装置，而海底电缆可以和双传感器技术以及4-C技术一块使用。使用固定检波器系统采集的重复性要比使用拖缆采集的重复性好。

第6章介绍转换波的属性与三维勘探设计。由于PS波传播路径的不对称性，PS波的勘探设计与P波采集不同。各种观测系统最小数据集的PS波照明差异要比P波大得多。例如，对于一个水平的反射界面，正方形“中心点”区域的十字排列产生的是矩形照明区域。射线路径的不对称性导致了要求对炮点和检波点进行不对称采样。炮点的采样间隔是由P波速度决定的，检波点的采样间隔是由S波速度决定的。平行观测系统往往受不对称的影响最小，而正交观测系统往往受不对称的影响最大。为了分析与方位有关的效应，最好选择面积观测系统。

第7章介绍三维对称采样实例。为了对低速同相轴进行分析，干扰波调查排列或微型排列常使用很高密度的空间采样进行采集。以荷兰获得了高密度空间采样的十字排列资料为例，其时间切片和横剖面表现出了地滚波锥体和锥内散射波的三维特性。

三维对称采样的理论在尼日利亚进行过试验，在那里对十字排列试验观测系统同标准的砖墙式观测系统进行了比较。在目的层深度，试验观测系统比标准观测系统得到的结果更好（分辨率更高、连续性更好）。资料改善的原因可能是由于试验观测系统的方位（横向最大炮检距）更宽，或者更可能是由于其更好的空间连续性。

这套尼日利亚数据集还说明了在有利条件下非常低的覆盖次数也能获得令人满意的三维叠前偏移结果。

第 8 章介绍影响空间分辨率的因素。不同采集观测系统的最小数据集也有不同的分辨率特性。理论上影响最佳分辨率的主要因素是正常时差校正引起的拉伸效应。因此，零炮检距数据可能有最好的分辨率。保持炮点和检波点的采样间隔不变，而减小“中心点”的采样间隔（面元细分技术）是不能改善分辨率的。仔细地选择“随机”稀疏采样可能会产生比规则稀疏采样更少的偏移假象，但是，为了消除所有的偏移假象，规则的密集采样是最好的。

第 9 章介绍倾角时差校正（DMO）。DMO 校正的理论是针对二维共炮检距道集研究出来的。最初，没有真正理解对三维资料应用 DMO 校正成功的原因。将 DMO 理论应用于最小数据集，特别是用于十字排列揭开了它的奥秘。现有 DMO 软件对单次覆盖数据集（十字排列）的应用暴露出有严重的振幅和相位假象的缺陷，这就促进了承包商对软件的改进。

第 10 章介绍叠前偏移。通常借助于菲涅耳带半径描述偏移半径。然而，为了完整地成像，菲涅耳带半径对于宽频数据来讲是不够大的。最好定义一个对偏移有影响的带（与以前在模型模拟中所做的那些相类似），并且使用这个带的半径去确定对偏移镶边的要求。大部分最小数据集都有着有限的范围，从而导致偏移的边界效应。然而，用炮检距向量片构成的准最小数据集比用该观测系统的其他单次覆盖子集产生的单次覆盖图像更好。

本书所讨论的思想和结果将有助于更好地理解三维采集观测系统的结构。有了这种理解，通过最佳地选择采集观测系统及其参数，就可以满足地球物理要求。应当考虑开发适应各种观测系统（尤其是正交和面积观测系统）具体要求的处理技术，从而得到更容易解释的结果。

这本书是对笔者的博士论文（答辩于 2001 年 2 月）稍加修改而成的，笔者矫正了其中的一些错误并增加了当前的新技术，特别是海上三维（4-C 采集）方面的技术。本书包括了到 2001 年 6 月为止的最新进展。

目 录

1 二维对称采样	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 二维炮点—检波点和中心点—炮检距坐标系统	(1)
1.3 对称采样	(4)
1.4 对称采样与非对称采样	(8)
1.5 叠加—组方法与对称采样	(10)
1.6 总叠加响应	(11)
1.7 结束语	(13)
参考文献	(14)
2 三维对称采样	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 三维观测系统的种类	(16)
2.3 连续波场	(19)
2.4 三维对称采样	(26)
2.5 拟最小数据集	(35)
2.6 叠前处理的应用	(41)
2.7 结论	(47)
参考文献	(47)
3 噪声压制	(51)
3.1 引言	(51)
3.2 低速噪声的特性	(51)
3.3 三维地震采集中的炮点和检波点组合	(55)
3.4 叠加响应	(64)
参考文献	(70)
4 陆上三维观测系统设计准则	(71)
4.1 引言	(71)
4.2 预备知识	(71)
4.3 观测系统的选择	(72)
4.4 设计标准和参数选择	(77)
4.5 勘探网格和勘探面积	(91)
4.6 实际考虑的因素以及与对称采样的偏差	(91)

4.7	试验	(103)
4.8	讨论	(103)
4.9	三维勘探设计工作小结	(104)
	参考文献	(105)
5	拖缆和固定检波器的对比	(108)
5.1	引言	(108)
5.2	观测系统痕迹	(109)
5.3	拖缆采集	(111)
5.4	固定检波器技术	(121)
5.5	综述和结论	(128)
	参考文献	(128)
6	转换波的属性与三维勘探设计	(133)
6.1	引言	(133)
6.2	PS 波场属性	(133)
6.3	PS 波三维勘探设计	(141)
6.4	讨论	(146)
6.5	结论和建议	(147)
	参考文献	(147)
7	三维对称采样实例	(150)
7.1	引言	(150)
7.2	三维微型排列	(150)
7.3	尼日利亚三维试验观测系统的结果	(154)
7.4	低覆盖次数数据的叠前偏移	(162)
	参考文献	(166)
8	影响空间分辨率的因素	(168)
8.1	引言	(168)
8.2	空间分辨率公式	(169)
8.3	空间分辨率的量度	(173)
8.4	讨论	(183)
8.5	结论	(184)
	参考文献	(185)
9	倾角时差校正 (DMO)	(187)
9.1	引言	(187)
9.2	任意三维采集观测系统的 DMO	(187)
9.3	十字排列的 DMO: 早期的软件不能正确地处理振幅	(193)
9.4	结束语	(195)

参考文献	(196)
10 叠前偏移	(198)
10.1 引言	(198)
10.2 菲涅耳带和影响带	(199)
10.3 模型实验的描述	(202)
10.4 最小数据集的叠前偏移	(203)
10.5 拟最小数据集的叠前偏移	(206)
10.6 速度模型修改	(211)
10.7 规则和不规则数据的真振幅叠前偏移	(212)
10.8 讨论	(212)
参考文献	(213)
关键名词中英文对照	(214)

1 二维对称采样^①

1.1 引言

在 20 世纪 80 年代,地震数据采集的理论再次引起人们的兴趣。尤其是 Anstery (1986)、Ongkiehong 和 Askin (1988) 引入了一些新的思想。他们指出:如果采集技术能确保共中心点道集中的检波点是规则分布的,则对地滚波的压制是最佳的。

Morse 和 Hildebrandt (1989) 与 Ak (1990) 应用野外实际数据的例子论证了叠加组合方法相对于那些检波点不规则分布技术的优越性。

在《地震波场采样》一书中 (Vermeer, 1990),笔者发展了这种检波点与炮点规则采样的思想。本章涉及了该书的一些最重要的观点,主要集中在对称采样作为最佳折中的数据采集技术的概念。

1.2 二维炮点—检波点和中心点—炮检距坐标系

沿着二维测线,坐标为 x_s 的每一炮都被坐标为 x_r 的检波器排列所接收。所有共炮点道集一起形成了叠前波场 $W(t, x_s, x_r)$, 这是一个三维数据集。叠前波场是平滑且连续的 (除了炮点和检波点的耦合变化之外)。

三维叠前波场 (对应于二维地震测线) 也可以用旅行时 t , 中心点 x_m 和炮检距 x_o 描述。这些变量的说明见图 1.1。两对空间坐标的关系为^②

$$x_m = (x_s + x_r)/2 \quad x_s = x_m + x_o/2$$

和

$$x_o = x_s - x_r \quad x_r = x_m - x_o/2 \quad (1.1)$$

在两个坐标系中对叠前地震数据集的描述展示在图 1.2a 和图 1.2b 中。每个 x 对应于单独一道,在图 1.2a 中,地震道是借助它们的炮点和检波点坐标描述的。这个地面图解是由 Taner 等 (1974) 引入的,用来描述静校正方法。图 1.2b 是同一道集在中心点—炮检距坐标系中的表示。这种表示也被称之为地下图。

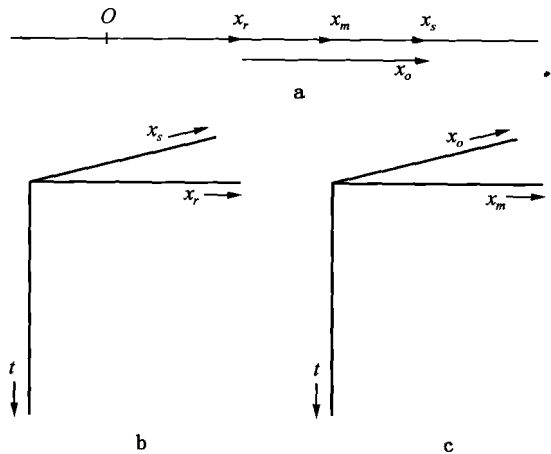


图 1.1 叠前数据的坐标系

a—关于地震测线的 4 个空间坐标; b—炮点—检波点坐标系; c—中心点—炮检距坐标系

① 本章是由 Vermeer (1991) 的文章修改而成的。

② 用这种标记法,炮检距向量由检波点指向炮点,在下一章中,将使用更符合逻辑的标记方式,其中炮检距向量是从炮点指向检波点。

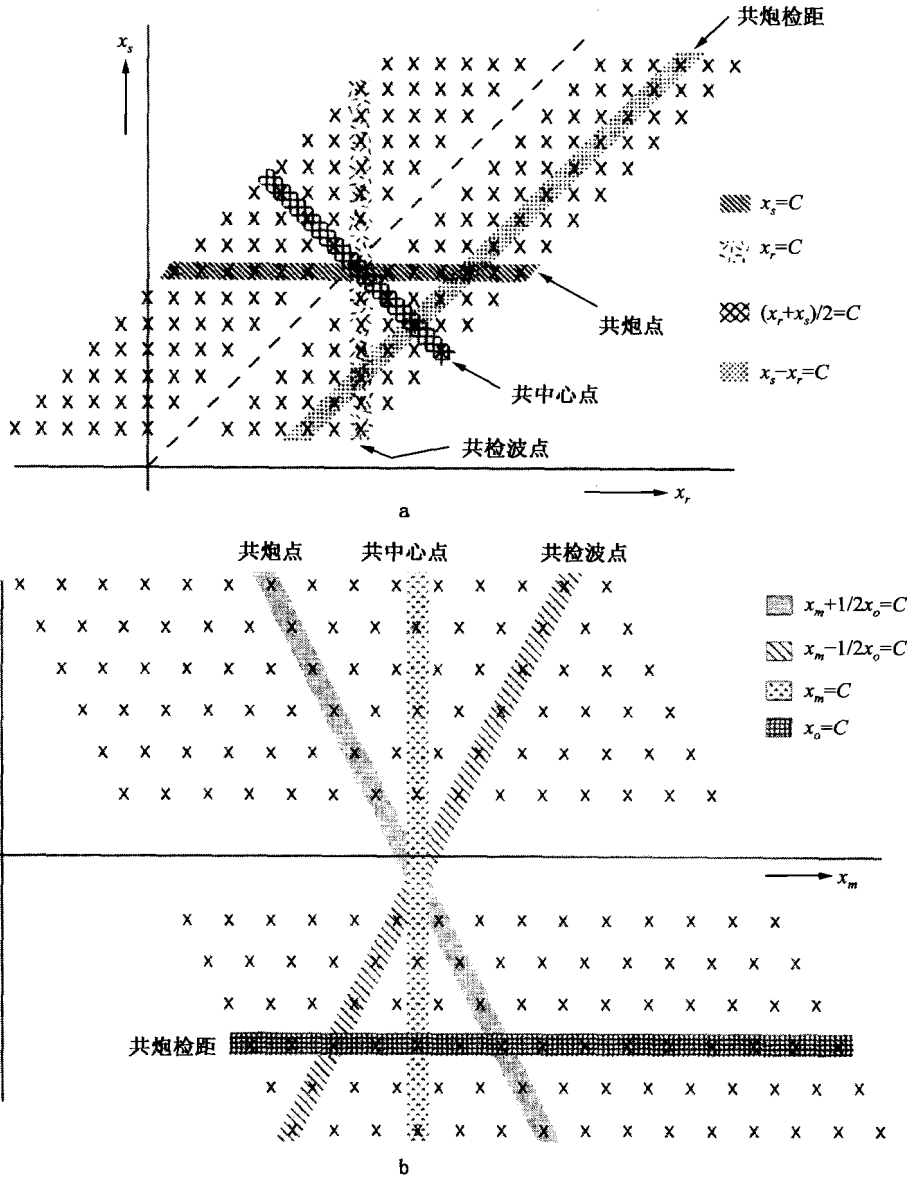


图 1.2 不同坐标系中叠前数据集的表示

a—炮点—检波点坐标系；b—中心点—炮检距坐标系。前者也称之为地面图或地面叠加图，而后者称之为地下图或地下叠加图

保持一个空间坐标不变，可以由地震数据集分选出 4 个不同的子集。图 1.2a 和图 1.2b 指出了这些子集。注意， x_s 为常数的共炮点道集的所有各道在炮点—检波点坐标系中由一条水平线表示，而在中心点—炮检距坐标系中，则由一条斜线表示。

保持时间坐标不变，就得到了叠前地震数据集的时间切片。在一个时间点上，空间坐标是变化的，这样地面叠加图和地下叠加图也可以看作是对时间切片中数据点的描述。

一般认为叠前数据中的反射波在共中心点道集中表现为双曲线。然而，重要的是要认识到：每一个波（同相轴）都代表叠前地震数据集的三维空间中的一个曲面。不要把叠前数据

的3个维度同地下的3个维度混淆。对于叠前资料，炮检距是第三个维度。例如，一个倾斜面的反射旅行时曲面如图 1.3 所示。这个图表示出了3个正交的剖面：共中心点、共炮检距和等时面。在共中心点剖面中，旅行时曲面的形状是一条双曲线，而在时间切片中，旅行时面却是一个椭圆。

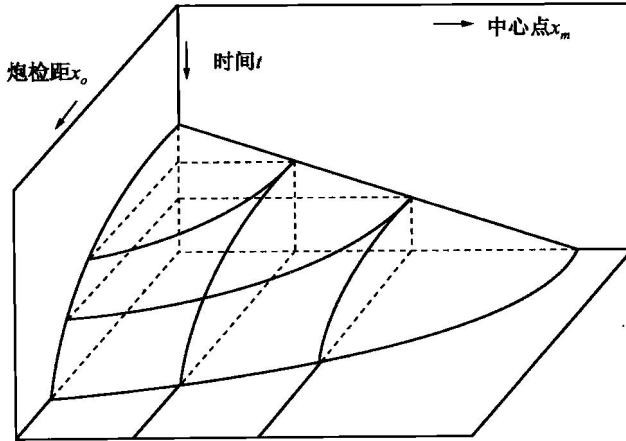


图 1.3 在中心点—炮检距坐标系中的倾斜同相轴
在共炮检距平面中同相轴是一条双曲线（对于零炮检距，它是一条直线），在共中心点平面中是双曲线，在时间切片中是一个椭圆

图 1.4 中给出了野外数据的例子。当然，现在有许多同相轴，每个同相轴都有它们自己的空间和时间关系。实际上，在这个例子中的共炮检距道集就是一条叠加剖面，它基本上是一条具有较高信噪比的零炮检距剖面。有可能通过所有这三条相交剖面追踪这些倾斜界面的反射。

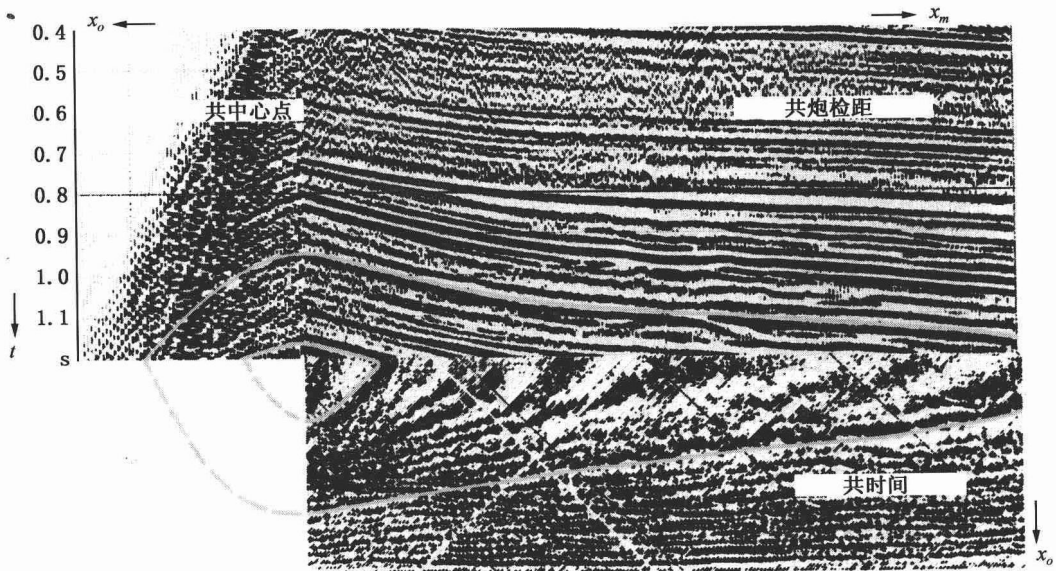


图 1.4 通过叠前数据集的三条相交剖面
注意，每个同相轴都是三维空间 (t, x_m, x_o) 中的一个面

由二维测线的叠前数据集建立时间切片是非常必要的。时间切片增加了对数据特征的认识，并且浏览一下整个数据集就能做出有益判断。NMO 校正后的时间切片能够对所选择的的目的层的速度进行快速的质量控制。

为了对时间坐标进行合理的采样，关键是要知道采样数据的最高频率。同样道理，对于空间采样，必须知道空间坐标的最大波数。讨论空间采样需要引入 4 个不同波数 (k_s, k_r, k_m, k_o)，它们分别对应于 4 个空间坐标 (x_s, x_r, x_m, x_o)。例如， k_s 和 k_r 可以通过傅里叶正变换来定义，即

$$W(t, k_s, k_r) = \iint_{\Omega_s} W(t, x_s, x_r) \times \exp[2\pi i(k_s x_s + k_r x_r)] dx_s dx_r \quad (1.2)$$

其中 Ω_s 是积分所包含的炮点和检波点的范围，公式 (1.2) 代表了时间切片的双波数谱，而 $W(t, x_s, x_r)$ 的三重傅里叶变换可以写成

$$W(f, k_s, k_r) = \int_{\Omega_t} W(t, k_s, k_r) \exp[-2\pi i f t] dt \quad (1.3)$$

式中， Ω_t 是积分时窗。

与两对空间坐标 (x_s, x_r) 和 (x_m, x_o) 相类似，两对波数之间也存在下列线性关系。

$$k_m = k_s + k_r \quad k_s = k_m/2 + k_o$$

和

$$k_o = (k_s - k_r)/2 \quad k_r = k_m/2 - k_o \quad (1.4)$$

通过将方程 (1.1) 的右边代入方程 (1.2) 就可以直接得到以上关系式。这就可以计算共炮点道集、共检波点道集、共中心点道集和共炮检距道集的 $f-k$ 谱。

无论考虑何种子集，重要的是要把不同的波数域区别开，因为它们代表着截然不同的物理效应。尤其是，炮检距波数 k_o 描述共中心点道集的速度效应，而中心点波数 k_m 描述共炮检距道集的构造效应。例如，对于水平的地下情况，在共炮检距道集中仅有一些水平的同相轴。所以其道集的波数谱只在 $k_m = 0$ 处有能量。在更实际的情况下，正的和负的中心点波数也有能量存在。

1.3 对称采样

地面叠加图和地下叠加图（在图 1.2a 和图 1.2b）中所描述的是已经采样的数据。图 1.5 用地面叠加图表示所使用的空间采样间隔。在这种情况下，炮点距和道距（检波器组间距）是相同的。在这一节中，我想提出这样一个问题：什么是对二维空间坐标 x_s 和 x_r 的最佳采样方法？

为了回答这一问题我们必须知道欲采样的三维叠前波场的特性。因为对炮点坐标和检波点坐标是分别进行采样的，所以既要在共炮点道集中也要在共检波点道集中考察波场 $W(t, x_s, x_r)$ 的特性。

共炮点道集是实际试验的结果，因此共炮点道集波场的特性可以用弹性波理论进行描述。另一方面，共检波点道集的各记录道是在不同时间对不同炮点分别记录下来的，那么共检波点道集波场的特性是怎样的呢？这里我们将使用互换原理：在一定的条件下，炮点、检波点互相交换的两次地震试验得到相同的地震记录道（Vermeer, 1990；Fokkema 和 van den Berg, 1993）。互换原理的结果是：在 $x_s = x_p$ 位置所激发的共炮点道集 $W(t, x_p, x_r)$