

油气勘探中地球物理 时间序列的反褶积

8429

石油科学进展 10

油 气 勘 探 中 地球物理时间序列的反褶积

[美] M. T. 西尔维亚 E. A. 鲁宾逊 著

甘章泉 程乾生 译

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是关于反褶积的一本专著。它在理论上和实践上都比较系统和比较完整,取材新颖,内容丰富。书中对地震波的传播作了新的叙述,讲述了层状模型,重点论述了各种反褶积理论,在第五章里以子程序形式给出了一些用于滤波和谱分析的计算程序,把与反褶积有关的数学概念与实际数值计算方法联系起来。

本书可供从事地球物理工作的技术人员、大专院校有关师生及其他有关技术人员参考。

本书的序言、前言、引言及第一章由蔡陆健同志校订。

Manuel T. Silvia Enders A. Robinson
Developments in Petroleum Science, 10
deconvolution of geophysical time
series in the exploration for oil and natural gas
ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY
Amsterdam-Oxford-New York 1979

*

石油科学进展10
油气勘探中地球物理时间序列的反褶积
〔美〕M. T. 西尔维亚 E. A. 鲁宾逊 著
甘章泉 程乾生 译

*

石油工业出版社出版
(北京安定门内大街东后街甲36号)
北京印刷一厂排版
北京顺义县燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 11 3/4印张 291千字 印 1—2,300
1982年9月北京第1版 1982年9月北京第1次印刷
书号: 15037·2324 定价: 1.20元

序 言

观之愈近，察之愈细。这一通常的经验，从对地壳内部、特别是对地壳复杂的近地面构造所进行的地震勘探中，可得到最好不过的例证。地震波自波源（例如，一次爆炸）出发，在其到达接收器的传播路程中，经受了許多影响。所有这些影响产生的效果都使记录复杂化了，与此同时，这些效果也传递了与地震波所经过的岩层有关的有用信息。但是，为了清理所有这种种效果，我们亟需进行地球勘探的工作方法，这些方法不仅应是有效的，而且，考虑到地震勘探中通常累积起来的巨量数据，这些方法还应当是高速的。这本由两位著名的地球勘探家写成的书，讲的就是这些问题，它写的比任何一本探险小说更为精彩。

但是，这本书还有它更深一层的目的。当今，人类为推进和发展现代社会，简言之，为了其生存，正在寻找比以往更多的能源。石油和天然气仍属最重要的能源。因此，我们要求有才干的地球物理工作者能从记录中提取尽可能多的和尽可能精确的信息。这一点，正当我们现在要在新的地区进行勘探，并且不能再满足于那些“石油流如水”的地区的时候，显得特别重要。我们要更紧张地勘探，并且要研究地球的更深处。若不使用本书中所讲的一些有效方法，那么寻找油气能源就不会有成功的机会。

这本书叙述了理论和实践两个方面。它值得向多方面的科学工作人员推荐。在书桌旁、在实验室或讲课厅内从事地球物理工作的人员，以及必须懂得如何更好地进行地震勘探和如何解释地球向他提出的课题的地球物理学家，都值得读一读这本书。

M. 巴恩 1977 年 9 月

前 言

在石油和天然气勘探中，地球物理工作者遇到的问题，是估计深达 6000 米以内的地下界面构造特性，精度要在数十米以内。估计的地区幅员达数百平方英里。地球物理方法采用间接手段，因为所有输入和输出都必须在地面上或近地面进行。这种方法由于六十年代初引入了数字反褶积而大大得到加强。这期间，反褶积在实践上有了许多应用，同时，在理论方面也做了大量的工作。然而，对于反褶积这一课题，还从未有过完整的、统一的叙述，使其用到的物理性质简化并能遵从数学的论证。

本书就是应这种对反褶积作一综合叙述的需要而写的。它从一些物理上观察到的事实抽象出其本质的数学性质。从本书给出的一些原则出发，各种反褶积可看成为统一的方法。

序章概述了地震勘探野外施工的情况，并讨论了运用地震数据以获得最后的地质深度、剖面的数字处理技术的步骤。

第 1 章对地震波的传播作了新的叙述。这种叙述建立在这样一个事实的基础上：岩层系统的直接传输响应是最小延迟。结果，大多数实际的勘探问题都可简化为两类典型的情形：即内初次反射的情形和外初次反射的情形。岩层系统的反射响应按这样两种情形来描述其特征，是新的提法。

第 2 章讲述层状地壳模型的古典结果。这些从前的结果，对于层状岩系的反射和传输响应，推演出了精确的表达式。反射系数，它的绝对值必须小于 1，而在大多数实际情况下，野外经常观察到的反射系数的绝对值比 0.1 还小。运用这一物理事实就可以说明，反射和传输响应能大大简化。这种简化为野外地球物理工作者解释反褶积的成果提供所需要的物理解释。再有，这些被简化了的响应正好也就是第 1 章里在纯物理背景下推导出来的响应。最后，根据这些结果，对于建立在野外经验基础之上的随机反射系数的假设，也给出了数学上的论证。

第 3 章中的材料说明了柯氏谱与古典对数位势问题的关系。引入了最小超前的概念。应用最小延迟和最小超前两概念间的对称性，任意一柯氏谱可分解成它的最基本的成分。这种分解对反褶积理论是起着奠基作用的。

在第 4 章里，从前几章引入的数学和物理模型，推导出一步反褶积。更为一般性的反褶积，称为 α -步反褶积，作为消除多次反射的一种方法而给出。其主要结果表明，甚至在源脉冲不是最小延迟的情况下，也能用 α -步反褶积消除多次反射。将证明，柯氏谱用于检测单回声的情形是最有效的。最后，讲到状态空间滤波，与以上反褶积问题有关。状态空间方法给新的反褶积方法的研究开拓了一个丰富的研究园地。

第 5 章以子程序形式给出了一些用于滤波和谱分析的计算机程序。这些子程序把与反褶积有关的数学概念与实际数值计算方法联系起来了。

M. T. 西尔维亚

E. A. 鲁宾逊

目 录

引言 地球物理勘探的一般知识	1
1. 地球物理勘探	1
2. 地震数据的数字处理	7
3. 地震数据的偏移	10
第1章 地球物理模型	14
1.1. 科学和工程中的模型	14
1.2. 地球物理模型的演进	16
1.3. 地球物理中的统计模型	18
1.4. 褶积模型	20
1.5. 鲁宾逊地震模型	21
第2章 层状地壳模型	30
2.1. 最小相位和最小延迟	30
2.2. 单层透射及反射响应	33
2.3. 多层透射及反射响应	38
2.4. 特征多项式与反射多项式	47
第3章 同态分析和谱分解	52
3.1. 工程和科学中的同态	52
3.2. 谱分解	54
3.3. 柯氏谱	59
第4章 反褶积	74
4.1. 预测反褶积	74
4.2. 预测反褶积用于消除多次反射	89
4.3. 柯氏谱反褶积	105
4.4. 状态空间滤波	111
第5章 关于滤波和谱分析的计算机程序	119
5.1. 引言	119
5.2. “标准”子程序组	119
5.3. 滤波程序组	134
5.4. 谱分析程序组	154
5.5. 结束语	170
附录 拉普拉斯 z -变换	176
参考文献	177
人名汉英对照表	182

引言 地球物理勘探的一般知识

1. 地球物理勘探

石油勘探中采用的三项主要的地球物理方法是地震法,磁法和重力法。磁法是最老的地球物理方法,做法是:测量由于构造的改变或由于岩石的磁化率的改变而引起的磁场的变化。沉积岩的磁化率一般比火成岩或变质岩的磁化率小,所以,对记录上的异常进行解释,可以获得沉积盆地的最大深度值。如今,石油勘探的磁法勘测通常都是在飞机上(航磁)或船上进行。重力法是测量离地面较上层的岩石所产生的引力的变化。较致密的岩石比疏松的岩石具有较大的引力。譬如,较致密岩层的构造隆起,在重力图上会呈现异常。寻找油气的重力勘测可在陆上、飞机上和海里(船上)进行。

最广为采用的地球物理勘探方法是地震法。讲述地震学的参考书籍有巴思(Bath)的入门教科书(1973);内容较深一点的,有巴思的书(1968)及他关于谱分析的著作(1974);讲述地球物理方法在石油勘探方面的应用的,有(多布林)(Dobrin, 1976)及鲁宾逊和特雷特尔(Robinson, Treitel, 1969)的著作;内容较深一点的,有克利尔保特(Claerbout 1976)^①,库尔哈纳克(Kulháněk, 1975)及里克(Ricker 1977)等专著。这些参考文献以及上百篇其它文献都列表附在书后。

勘探地震学分为反射地震学和折射地震学两个分支。大部分石油勘探工作是用反射地震法做的。反射地震法是通过量测地下岩层反射上来的反射波的到达时间,绘出地下沉积岩界面的构造。采集和处理反射地震数据的技术是按这样一个想法建立起来的:产生的地震能量,透过地层介质进行传播,地震波在界面上产生反射,在地面或近地面利用接收设备把它测量并记录下来。陆上和海上基本上都是这样做的,仅设备装置有所不同而已。在陆上,地震能量是在地面或近地面通过一组小的化学爆炸,或震动装置,或敲击设备而产生的。地面上预先放好的检波器排列成行,如图0-1所示。源能向下传播而形成的地震波在各个界面上反射回来,被检波器接收。然后由一中心记录仪对这些模拟信号进行数字采样,并把它们录在磁带上,以备下一步进行分析。在海上则用象气枪组这样的震源。在地震船按预定航线行进时,每隔几秒钟就可以激发一次。地震波由拖在船后的电缆(称为等浮电缆)中装备的检波器拾取。和陆上勘探一样,资料也是传送至中心记录仪,以数字形式录在磁带上。

现在我们来描述一艘典型的海上地震勘探船的特点。这是一艘钢壳的舰艇,长55米,宽12米,吃水4米。船上装有双螺旋推进器和平衡系统。可提供24人(船员和地球物理工作人员)的食宿。对于地球物理工作人员还提供了办公地点,此外,还有仪器舱,和为电缆绞车使用的封闭的船尾甲板,以及直升飞机平台。该船巡航速度为每小时18公里,拖缆速度每小时7~10公里。船用导航设备包括一对约38公里测程的雷达,以及配有自动驾驶,陀螺罗盘,多普勒声纳、速度计和计算机的完整的综合卫星导航系统。

^① 中译本名为:《地球物理数据处理基础》,石油化学工业出版社,1979。——译者

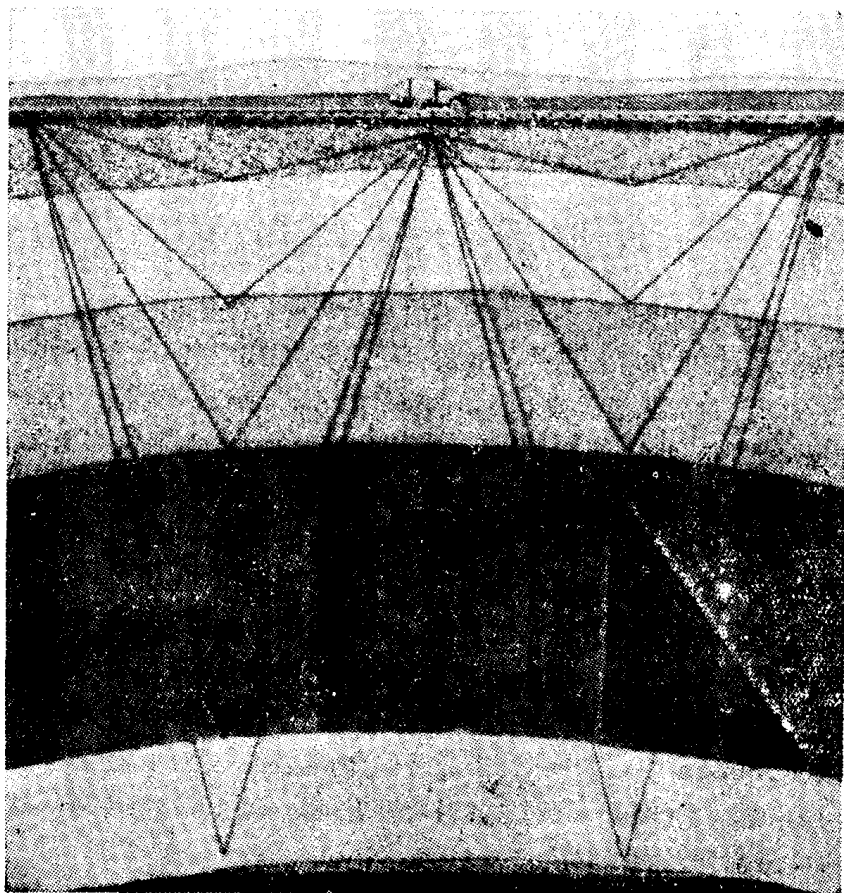


图 0-1 地震勘探示意图，画了一次反射。（生油层深度可达 6 千米）

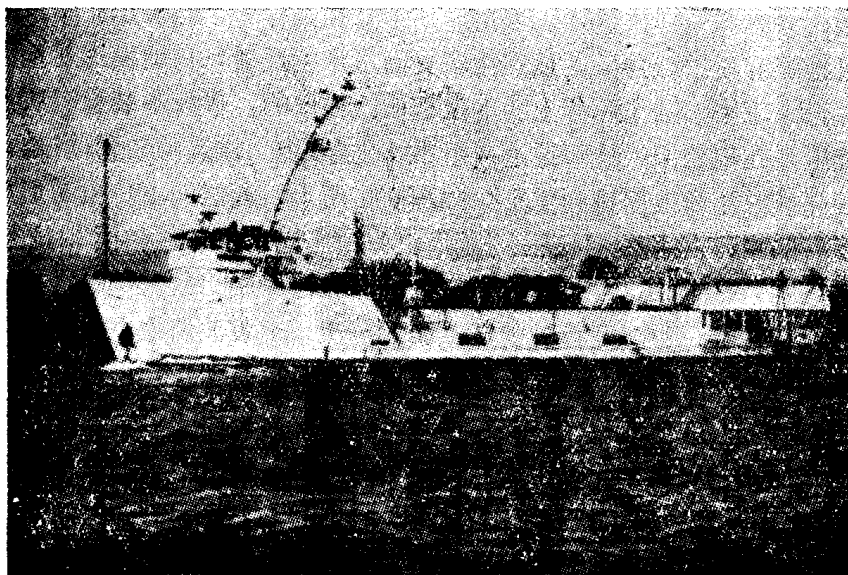


图 0-2 地震勘探船

海洋地震勘探中，采用种种导航系统，如劳兰 (Loran)C 型等。许多勘探中，用卫星定位系统作为主要的定位系统。卫导系统的优点在于：昼夜 24 小时任何天气下均可操作，能通过实时统计滤波以提供“理想的航线跟踪”能力。计算机控制的自动舵可使航向校正最

小，倾斜计提供动态校正以改善卫星定位和导航的精度。还有，录在磁带上的所有传感器数据，可供事后快速分析并由计算机绘出图体，在 200 米水深或更浅一些的水中与计划测线的正常平均偏差小于 300 米，而事后绘出的炮点精度为 100 米，更高的精度则要花费更多的成本才能达到。

海洋勘探中一种有效的地震能源为套筒式爆炸装置。八个气枪于 6 米水深处拖排成一个 22 米乘 12 米的阵列。这套装置的全部气枪性能，由机械控制台上不同的测试表头进行连续监视。按导航系统的命令引爆，每对气枪的合成脉冲在监视记录上显示，并录在磁带上。图 0-3 显示了一个典型的震源子波（即气枪信号脉冲）。典型的质量控制标准为：

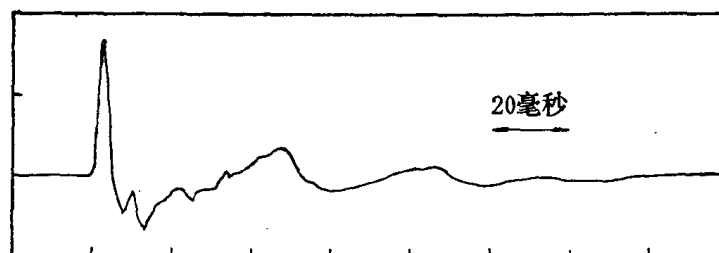


图 0-3 典型的空气枪信号脉冲

(1) 每相连的 4 炮中，不得多于 3 个“哑炮”，每 12 炮不得多于 6 个“哑炮”，每 20 炮不得多于 8 个“哑炮”，每 100 炮不得多于 16 个“哑炮”。每条测线上，“哑炮”的记录不得超过 6%。一个“哑炮”的意思是指由于仪器的故障或操作员的错误，在一张不可复得的原始记录里，超过了 2 个死道或严重干扰道，或正常激发的气枪少于 6 枪。

(2) 新测线开始时不得多于 1 个死道。

(3) 主拖缆上的噪声水平的均方根值不得高于 5 微巴。缆尾浮标装有雷达目标，可以允许第 1 通道上的噪声水平超过可容许的限度（一般拖缆噪声水平为 3 微巴）。

(4) 主拖缆与航线之间的羽角不得大于 12° 。

图 0-4 为将放入海水中的一个气枪。

缆索在船后拖着，低于水面。地震勘探用的拖缆是一高性能而又操作灵活的器件。突出的特点有：它的野外可维修性，无旋稳定性，快速的连结用的接头，坚固的端盖，高灵敏度的海洋检波器，以及为了适合专门记录要求可以灵活的装配。拖缆能快速分段拆装，且装有中心承压索，外表敷了一层耐用的、坚韧而抗寒的乙烯树脂，固而误工时间极少。中心承压索为耐扭的镀锌飞机钢拉成的钢丝索（外径 0.7 厘米），其最小断裂强度为 5000 公斤。有 0.05 厘米厚的高绝缘层防止漏电。48 通道的电缆总长有 2400 米，分成 48 段（一段接一通道），每段为 50 米长。在这 50 米长的一段电缆里装有 40 个海洋检波器。每个检波器大小为 6 厘米乘 1.25 厘米，重为 27 克。每一段里的检波器并联连接。导线为 24 号（美国线规）有色码的无复线的合股线。每一段电缆都封闭在一直径为 7 厘米的塑料套管（表层敷有乙烯树脂）里，两头有端盖，所以各段电缆都可以拆开和互换。为使各段电缆保持一定的浮力，塑料套管的隔层还充了油。因此拖缆极易着火。沿着电缆，等间隔地装有压敏深度控制器，能使缆索保持在最合适的深度。按 50 米长分段，对于布置所需要的排列是有好处的。图 0-5 是船尾甲板上的电缆绞车的照片。图 0-6 为船拖曳电缆的示意图。

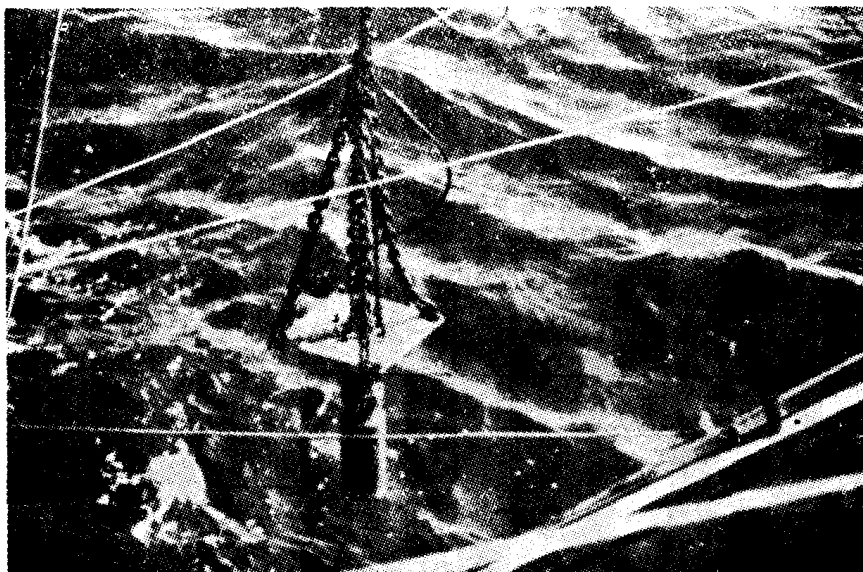


图 0-4 即将放入海水中的气枪

每一段电缆中直线组合的 40 个检波器称为一组。同组中的所有检波器收到的信号组合成一个信号，称为一个地震道。所以，每当震源激发一次，48 组检波器的电缆可得 48 个地震道。这 48 个地震道通过具有 48 个通道的船上记录仪器以数码形式录在磁带上。

以上的描述适用于深水勘探。世界各地，也在各种不同的条件下进行着浅水地震勘探。作这种特殊勘查的目的是要把陆上与海上勘探连结起来。为了勘探那些船多、流急的河口，淤泥、暗礁和其它海岸特性的地区，以及有大的潮汐的海边，仪器和勘探方法等方面都必须灵活多样。这些浅水区域需要用吃水浅的船，以及其它特制工具，如平底船、双体船和气垫船等。

陆上勘探遍及世界各个地区，甚至一些城市（如洛杉矶）及北极的冻土带、热带的丛林也

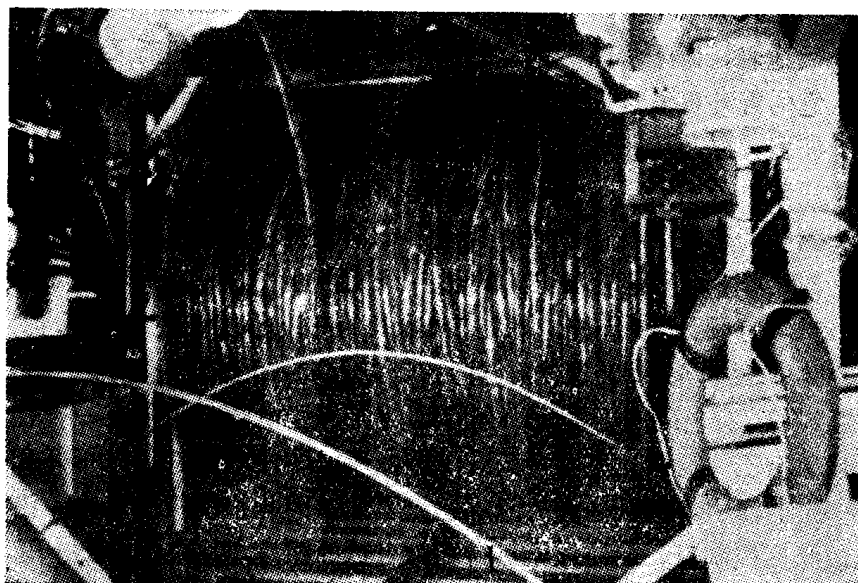


图 0 5 船尾甲板上卷在绞车上的电缆

不例外。我们举阿拉伯沙漠里石油勘探的情况简单说一说。在这里，装有空调的拖车和直升飞机已替代了早期石油勘探人员在沙漠里使用的帐篷和骆驼队。震源可用小药量组合爆炸，不过，如今经常使用的是比较轻便的机械敲击器重锤。这种重锤，装在一特制的车辆上，是一个气体驱动室，它能短促地敲击地面。通常都是好几台这样的装置在一起工作并同时敲击。野外地震队的成员可能多于100人。生活和办公用的空调拖车由具有沙漠行驶装备的重型卡车拖送至宿营地。许多地区沙被较厚。轻重型车辆装上了适当的沙行轮胎，也是能行驶的，不过常常需要走迂回的路线，避免陷进深沙。也常用直升飞机，运送人员和供应品到遥远的地区。

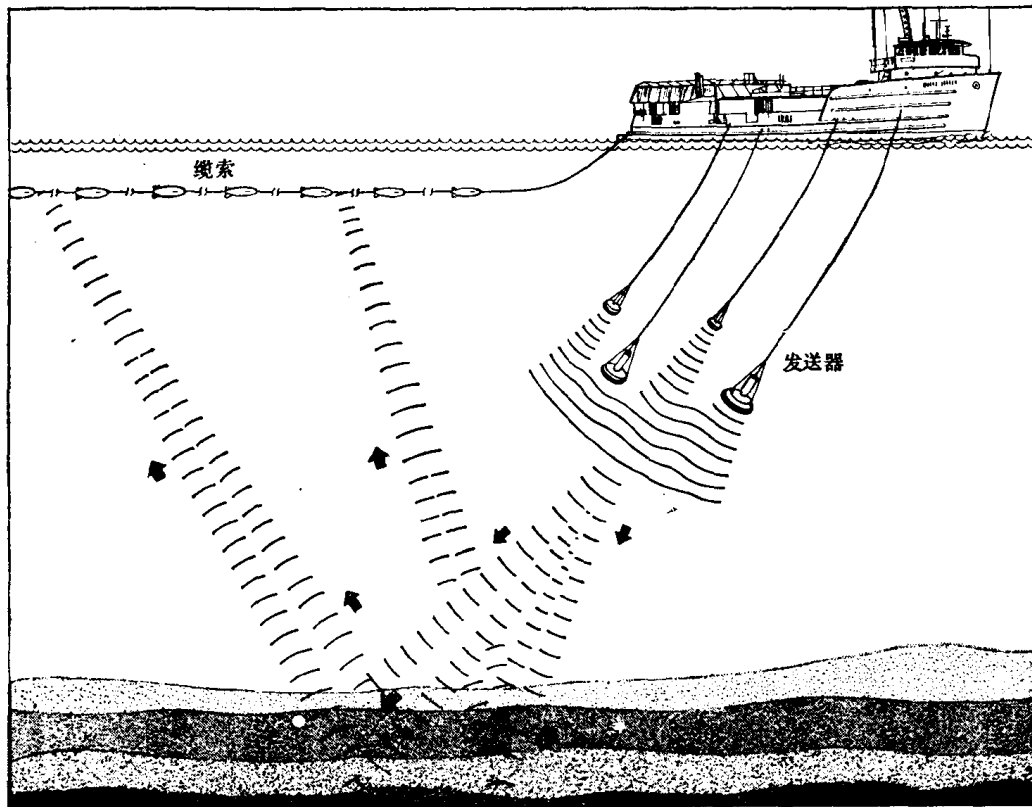


图 0-6 船拖曳着缆索

可以说，地球物理勘探工作正愈来愈多地向世界的边远地区伸展。进入这些地区是困难的，在这些地区施工也是困难的。还有许多近海地区正引起人们的兴趣。例如，佛罗里达西部近海就是海上数据采集的一个主要区域。图 0-7 描绘了美国内政部 1973 年开列的招标地带(黑块)。石油公司利用地震成果评价这些出租地带作竞争性投标。

地震数据通常都在中心地区(如休斯敦，伦敦，新加坡等)的计算中心进行处理和解释。然而，随着小型计算机的出现，愈来愈多的处理已在野外做了。在采集地震数据时，预计不到的干扰信号也和所需要的主要信号同时被记录下来。这些不需要的信号笼统地称为噪声。在处理中心，使用一套软件系统在增强信号的同时衰减这些噪声。地震学的内容还包括一些重要的和不断研究和发展的程序可以进一步改善地震记录上的信号。磁带按石油公司填具的明细表进行处理，之后，归档存库，或送回有关石油公司。

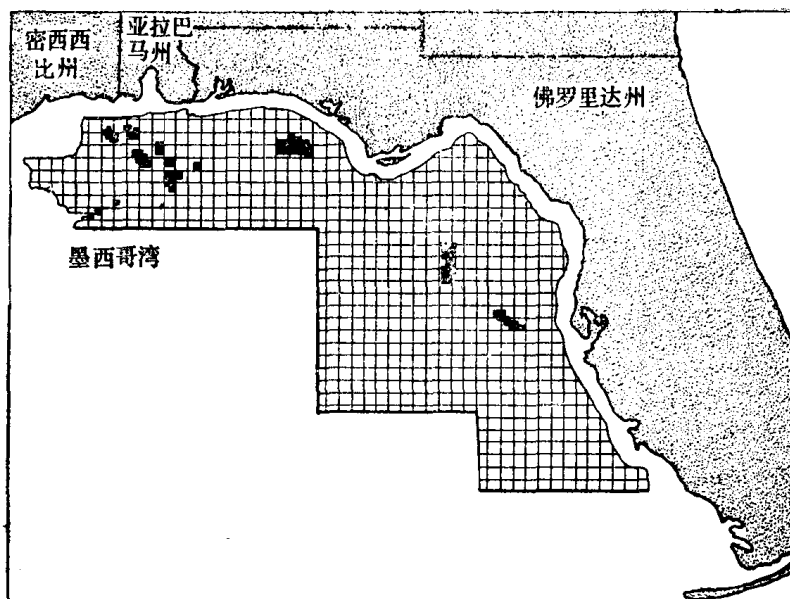


图 0-7 1973 年佛罗里达西部近海招租地带(用黑块表示)图

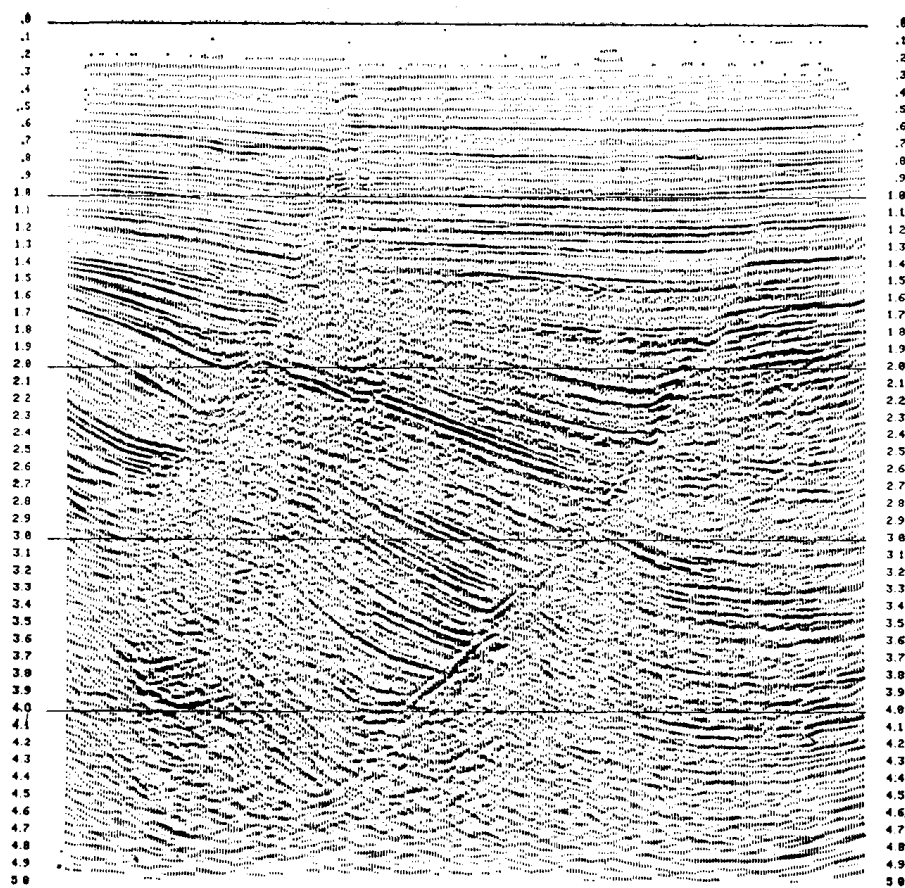


图 0-8 地震勘探的最后成果——深度剖面

图 0-8 为地震勘探的最后成果，即在用所有处理方法作过处理之后最后得到的地震深度剖面。这张深度剖面显示了佛罗里达近海区地质构造的一部分，表明有储油的可能性。石油公司根据这样一些深度剖面，确定向政府招租地带投标的面积。图 0-9 展示了一个近海钻探平台，依据地震深度剖面打石油初探井。

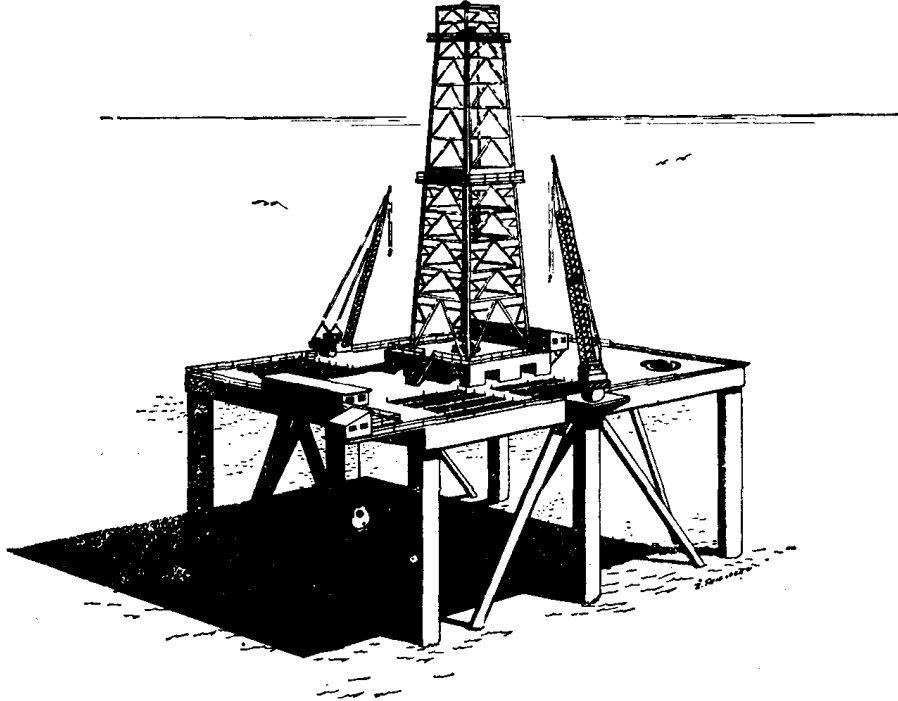


图 0-9 近海钻探平台

2. 地震数据的数字处理

地震勘探承包商或石油公司在一次地震勘探规划的实施中，实际采集到的地震道数以百万计。对这些地震道必须进行分析，以获得地下沉积构造的等值线图。用这些图给探井定井位。由于昂贵的钻探费用和更加昂贵的租赁有远景的产油地区或向外国政府取得石油特许权费用，使得人们期望地球物理成果要准确。这些地球物理成果必须经得起钻探的检验。地震的方法之所以有用，全靠它的成果极为精确。例如，地震勘探能够描述地下深达四千米地质构造，而保证精度在数十米以内。考虑到数据采集工作往往是在恶劣的条件下进行的，从合理的要求来看，这样的精确度是高的。许多北极地区的勘探要在冻土带冰冻的冬季进行；温度在零下 50° ，有暴风雪，且冬季的黑暗使得在这种地区干活是危险的。由于错综的波组是通过深达地壳六千米的一些结构复杂的岩层形成的，所以地震勘探的精度决定于解决复杂问题的解释工作。地震数据数字处理的目的是把这些录在地震记录上的复杂波组转换为能用来确定地下构造的有意义的信息。

理想上，要能将所有这些数据输入一台计算机，配合一些必需的波动方程，一下就出来最后结果，那当然很好了。不过，我们还没有这样一种极终的方法。我们还必须通过一系列操作来处理这些数据，每一步操作都包含一些重要的近似和简化。地震分析是甚为复

杂的，甚至在给定情况下，连大致地弄清楚哪些参数是重要的，哪些参数次之，也要费不少气力。每一步操作都是根据从事野外分析和解释反射地震记录的地球物理工作人员多年积累的物理观点而安排的。他们的体会之一，就是分析工作需要了解地震记录剖面的统计特征。我们并不要求知道每一地震波确实在哪里传播，但是，我们需要知道，平均起来看有多少地震波在这里和那里运动，以及波的相互重叠和相互抵消等特点。这种统计解释构成了用于地震数据分析的所有重要的数字处理技术的基础。这些数据分析包括速度分析，静校正和动校正，叠加，源信号分析，反褶积及偏移。本书的内容是讲反褶积，为了说清楚反褶积技术与处理过程中的其它技术之间的联系，我们要简单地介绍刚才提到的那些操作。

首先讨论一下速度分析。地球的沉积岩层近乎是水平的，不过它们还会有背斜、不整合和断层这样一些可能成为石油圈闭的形态。为了绘制地下界面图，地球物理工作者必须把接收到的地震道（它们记录的同相轴是时间的函数）转换成深度函数。此即：在地面记录的时间函数，必须转换为深度的函数。与无线电波不同，地震波的波速极为明显地与介质有关。因此，波在地壳里传播时，速度是变化的。一般说来，波速是随深度而增加的，尽管偶尔也会有些岩层使波速降低的现象发生。对于一个给定的地面点，按深度绘出的速度（曲线）称为速度函数。于是，在反射地震学里，有两个同等重要的变量：反射的波至时间和波速。已知这两个变量（的值），便可确定反射界面的深度。由于速度有重要的横向变化，即由于速度函数从一个位置到另一个位置是变化的，光靠一个给定的速度函数是不能适用于整个探区的不同地段的。因此，速度函数必须在探区范围内按地面点位置连续地进行修正。

测量速度函数的一种方法是钻深井，即油井，将地震检波器放进井里不同的深度，以测定速度。然而，在大多数情况下，必需由限定在地面的测量来估计速度函数，因为油井仅在老的探区才有可能利用。速度函数是可以通过分析由横向散开布阵的检波器接收到的同一同向轴的时差而估计出来的。任何这种分析与估计总要依赖一个“单打一”的假定：即暂认为其它一些条件相同。计算机根据许多复杂的时-距关系式进行计算能确定速度，其结果能把平均速度做为旅行时（或深度）的函数表示出来，称为速度谱。

在操作序列中使用的另一重要的数字技术是确定静校正和动校正。由于近地表的横向变化，每一道都要校正一个时移，它是由于要把震源和接收器都放置于一个假想的水平基准面上而引起的。这一时移是由源点校正和接收点校正叠加合成的，总称为静校正。

动校正把每一道都转化为好象源点和接收点都落在其实际的震源和接收器位置的中点的等效道。在这一转化中，我们涉及的还仅是所谓初次反射构成的道。根据射线理论，初次反射的形成是射线经由震源出发向下到反射界面，然后径直向上被接收器接收。给定了速度函数，这个射程可由斯奈尔定律计算出来。如果岩层都是水平的，那末反射点（或深度点）便正好在震源与接收点的中点的下方。如果岩层有了倾斜，则这些深度点要偏离中点。因此，动校正与速度函数和反射层的倾斜度有关。由于震源与接收器位置的距离而算出的校正量称为正常时差校正，而由于倾斜算出的校正量称为倾斜校正。

因此，对记录道要做的重要校正有四种：源校正，接收点校正，正常时差校正和倾斜校正。每一记录道是由反射同相轴及各种干扰波和噪声一起构成的一个时间序列。需要的反射同相轴是初次反射，即向下行进到某一反射层然后向上回到地面被记录下来的波。一

种重要的不需要的干扰波是多次反射。多次反射的射线是，向下到达某一反射层，然后向上遇到另一反射层，再向下又到达另一反射层，如此继续，直到该多次反射录在其记录上(参看图 0-10)。在任一层岩系统中有无穷多种可能的多次反射。多次反射的存在，给识别初次反射增添了困难，从而需要在最后显示时尽可能地减弱多次反射。因此，在计算机处理过程中，除了要做上述各种校正之外，还需要做衰减多次反射和其它噪声的处理。

为达此目的，地震数据是通过特殊方式采集的。对于每一震源放置一检波器的排列(或阵列)，震源激发(放炮)，记录各道，然后整个排列作横向移动，再放炮接收，如此过程进行重复。排列移动的增量足够小时，每个深度点就被覆盖好几次(多次覆盖)。对于六次覆盖，每个深度点将记录六道，近道炮检距最短，远道炮检距最长。由此可见，按多次覆盖作业记录下来的地震数据含有可观的重叠或重复量。这种重复有助于我们做必要的校正和大大削弱那些不需要的干扰成分和噪声。

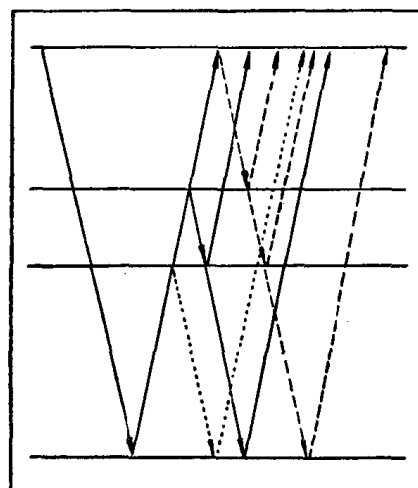


图 0-10 某些多次反射的射线

例如，可以把勘探中得到的那些具有相同炮检中心点的道收集起来组成一道集。在“单打一”假定下，我们仅考虑正常时差校正而暂置其它于不顾。做过适当的正常时差校正后，同一道集内的每一道将转化为同一等效道，即假想震源和检波器都正好放在公共的那个中心点上而接收到的初次反射道。换句话说，经过这适当的正常时差校正后，同道集的所有各道的初次反射将是同相位的，从而使这些校正了的道成了相同的道。令 $c(n)$ 表示在作了正常时差校正 n 后共中心点道集中各道相同性的度量。如果我们取不同的校正值描出 $c(n)$ 的图，那末在“单打一”假定条件下，其适当的校正当为使 $c(n)$ 达到极大的那个 n 。实际工作中，常常是运用一个预定的速度函数对数据作初步的正常时差校正。在这种情况下，往往还要作二次校正，即反过来对原预定的速度做过校正后再作的剩余正常时差校正。

用于上述正常时差校正的“单打一”方法，也可以用来对不同的道集做适当的源校正、接收点校正和倾斜校正。另一方面，也有不这样“单打一”地一次只做一种校正，而使用同时校正方法。因为问题的复杂性，叠代法比直接算法较易设计出来。

现在我们来讨论操作序列中下一个重要的技术，即叠加。由于地震勘探多次覆盖方法所具有的重复性，不需要的干扰波和噪声可通过叠加予以削弱。如我们所知，动校正把共中心点道集里的各道上的所有初次反射校到同相位。又由于多次反射的射程是各不相同的，动校正并不把多次波置于同一相位。因此，如果我们把共中心点道集中的各道加在一起(即叠加)，就能大大削弱这些多次反射以及其它含有的噪声。于是，我们于每一个中心点得到一输出道，称为该中心点的叠加道。此种类型的叠加通常称为共深度点(CDP)叠加，虽然更确切的说法应是共中心点(CMP)叠加。用中心点替代深度点说法的原因在于：对于倾斜的地下界面，深度点(即反射点)并不正好位于炮检中心点的下方。共中心点(CMP)叠加依据这样一个事实：多次反射的反射时间随炮检距的增大比它们所叠扰的

初次反射的反射时间增长得更快些。叠加之前要作静校正，它们是些与反射时间无关的时移量，用以补偿地表及至少在地下水深度以上的所谓风化层特性的不规则性。

源信号分析以及有关的数字滤波技术与其它学科中采用的方法本质上是一样的，所以我们在这里不予讨论。这里，我们主要涉及一些地球物理工作者特有的方法。

现在我们简要地介绍一下反褶积，这是本书的主题。多次反射的一种特殊类型是所谓的交混回响。进入近地表的能量会被上下来回反射，且当初次反射透过近地表层时此能量就附加在它上面。因此，人们往往得不到具有好的时间分辨率的尖锐而清晰的反射，得到的却是拖着长长的混响尾巴的反射。相邻的初次反射的混响尾巴相互重叠，使得整个地震道呈现鸣振或呈正弦波形，很难或简直不可能拾取初次反射的波始时间。这个问题的解决办法是消除其混响尾部中的能量，而不损害初次反射，从而提高所有反射信息的分辨率。这种处理过程称为反褶积，它是通过下述途径完成的。如果我们研究一个初次反射及附加在它上面的混响构成的子波，从能量的角度考虑就会知道，该子波是最小延迟。还有，这样一些子波近似地具有相同的形状。由于初次反射是由地下一些不规则厚度的岩层形成的，它们的到达时间实际上是随机的。因此，地震道的自相关函数与子波的自相关函数是一样的，所以从这个自相关函数，我们能算出所需要的逆算子（或反褶积算子）。把这算子作用于地震道，便得其反褶积道，即已消除了子波的混响成分的道，从而提高了初次反射的分辨率。反褶积处理也能用来消除某些长周期的多次反射。这类反褶积称为 α -步反褶积。实际工作中，在叠加前或叠加后做反褶积都可以，视费用或其它考虑而定。

3. 地震数据的偏移

在数据处理成果绘图输出之前，最后一个数字技术乃是偏移。偏移这个词，在地震数据处理中使用它，具有特殊的含义，不应与这个词的其它用法相混淆，如象石油从原生岩至一石油圈闭的偏移等等。地震处理中使用偏移这个词还有另一种说法，即归位处理也就是说，把在地面观察到的传播上来的波按时间反推回到地下构造上去。在所有地下岩层完全处于水平的地理区域，这种归位处理是取绝对垂直的途径。然而，如果地下岩层倾斜或弯曲，那末归位处理将偏离垂直位置，走的是曲线路径。进行偏移或归位处理的理由是，它能揭示地下界面各反射点的实际的空间位置，而未经偏移的在地面观测到的地震数据只给出了视反射位置。因此，偏移可以说是把地面观测到的数据转化为好象是在地下深处观测到的数据。也就是说，偏移是把数据推回地下的一种数学上的处理，目的是揭示地下构造的真实的空间位置。参看哈格多恩 (Hagedoorn, 1954)；斯托尔特 (Stolt, 1978) 等文献。

在物理学中，人们通常不考虑偏移而只想到绕射。绕射代表了正过程，而偏移为其逆过程。假定在地下深处有一点源。波能量从这点出发向四面八方传开，在各向同性的均匀介质中，波前将是球面。而在非均匀介质中波的运动没有这样简单。譬如，当波通过一不透明体的棱时，一些能量偏转（或绕射）进阴影区了。地壳中许多绕射岩层的存在意味着，来自不同绕射的诸波前将相互干涉。经由这种错综复杂的情况，波组来到了地面，记录下这波组就成为地震数据。（注意，物理学中，干涉和绕射一般用来描述同一类波动现象，这两个术语之间没有明确的物理区别，仅在使用上略见不同。通常，当仅有几个，譬

如两个相干源时，其结果称为相干；而当有大量的相干源时，则绕射这个词更为常用）。

共中心点（CMP）叠加记录剖面是由沿测线的所有 CMP 叠加道构成的。CMP 叠加剖面近似地具有自激自收记录剖面的特性。这种源点和接收点位置的重合性有下列两点推断：（1）尽管能量在地面炮/检位置与反射界面之间的传播路径可能很复杂，但其上行与下行路径必须一致。（2）能量传播路径与反射界面成直角相交（参看图 0-11）。波动方程能描述物理实验产生的波的运动规律。然而，叠加记录剖面并不与任何单一实验形成的波场相对应。得到这些记录时，曾顺序地放过许多炮，但从叠加记录剖面来看，好象所有这些炮是同时激发的。因此，我们要假设一个理论上的物理实验以便能把波动方程用于叠加记录剖面上出现的波的运动。这个理论上的实验是这样布置的：接收器放在地面，但震源已不在地面，而是分布在地壳内部。更为特别的是，沿着各反射界面分布了震源，强度与其反射系数成正比。所有震源都于同一瞬时（即 $t=0$ ）激发。这样我们仅限于研究向上传播的波，即从地下震源出发传到地面接收器的波。由于叠加和反褶积已有效地消除了多次反射，在我们的实验中就省略了对多次反射的考虑。如我们所已知，地震道是按双程旅行时，即从地面到深度点来回旅行的时间记录下来的。而在我们理论的实验中，我们仅考虑从地下深处震源到地面接收器的单程传播。所以我们必须把叠加记录剖面从双程旅行时转化为单程旅行时。这一转化很简单，将叠加记录的时间标度除以 2 就成了。

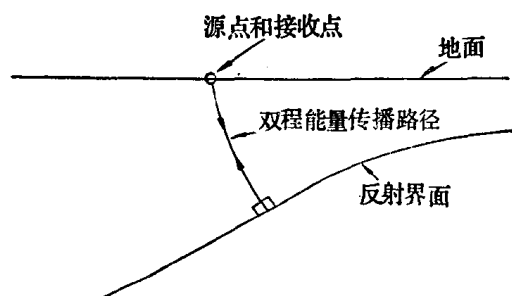


图 0-11 源点和接收点位置重合情况下能量传播路径(上行和下行)

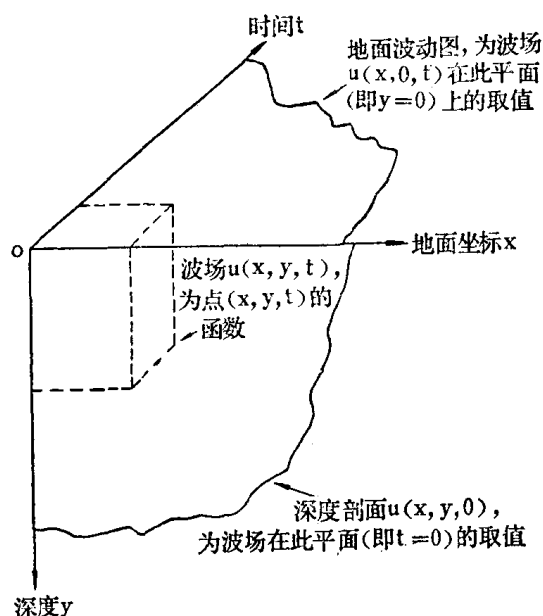


图 0-12 表明地面波动图平面和深度剖面平面的波场空间

偏移问题，现在可以用下面的话来表达。为简便起见，我们考虑二维空间 x ， y 和时间 t 。坐标 x 为沿地面测线水平距离，坐标 y 为表示深度的垂直距离，向地下为正。全波场用函数 $u(x, y, t)$ 表示。于时刻 $t=0$ ， $u(x, y, 0)$ 表示各震源初始时（即所有假设的布置于地壳内部的各震源同时起爆的时刻）波的运动。按照我们理论的实验，震源都放在反射界面上，强度与其反射系数成正比。因此， $u(x, y, 0)$ 表示了地下地质构造的截面，称为深度剖面。于深度 $y=0$ （即在地面），波场 $u(x, 0, t)$ 称为地面剖面（我们译为：地面波动图——译者注）。地面波动图表示沿测线采集的作为时间函数的地震数据；深度剖面则显示需要知道的地下地质构造。偏移问题可以简述如下：给定了地面波动图 $u(x, 0, t)$ ，求深度剖面 $u(x, y, 0)$ （参看图 0-12）。