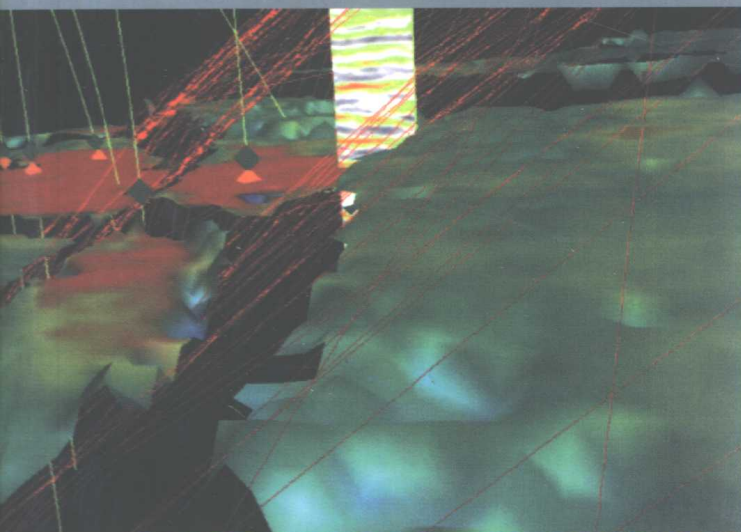




实用开发地震

庞彦明 黄德利 刘云燕 高兴友 编译



石油工业出版社

PETROLEUM INDUSTRY PRESS

实 用 开 发 地 震

庞彦明 黄德利 刘云燕 高兴友 编译

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书用非常简洁的语言讲述了地震勘探数据采集、处理 and 解释的基本原理和方法,介绍了 VSP、AVO、3D 地震勘探和地震层析成像等先进技术,并提供了大量的勘探开发实例。本书可供油藏工程技术人员、地质人员、野外工作人员及具有勘探知识的管理人员使用,同时也能为负责协调勘探与开发工作的管理人员有一定的借鉴作用。

图书在版编目(CIP)数据

实用开发地震/庞彦明等编译.
北京:石油工业出版社,2001.4
ISBN 7-5021-3339-9

I.实…
II.庞…
III.地震勘探
IV.P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 19252 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 18 印张 460 千字 印 1—1500
2001 年 4 月北京第 1 版 2001 年 4 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3339-9/TE·2502
定价: 35.00 元

序 言

在过去 40 年内,石油工业已取得了突飞猛进的发展。在最初,钻井主要基于表层地质异常和直觉,这样,大的构造被发现了,但小构造却越来越难以发现。

现在全世界范围内储量也没有多大变化,然而在某些地区储量可能还增加了。这要归功于在勘探方法领域不断地采用先进技术。

提高勘探钻井成功率的努力促进了勘探地下构造技术如磁法、电法以及地震方法的巨大进步,地球物理技术已发展到测量井孔中的参数,如密度、声速等。

油气田的发现与开发是一项系统工程。虽然每个部门都保管着其特定活动中所测量的珍贵的信息,但这种信息在以往往往仅限制在部门之内,其它部门并不能从中受益。虽然各自的任务做得都很好,但由于各部门之间缺少沟通,总体结果并没有预期的那样好。

本书的一个目的是通过使油藏工程人员熟悉地震方法,促进各学科人员之间的交流,并展示地震方法是怎样被地质人员、工程人员和其它人员应用的,从而扩大他们的信息,使其更自信地作出自己的决定。

储层地震专家将不同部门所代表的学科知识结合在一起。地质科技人员把地质和岩石物理特性的信息与储层地震学信息结合在一起。他们的任务是把观测的地震振幅、速度与岩石的弹性特征和岩性或流体含量联系起来。

通过描绘井间横向及垂向上的这些特征,储层地震人员能确定出储层的横向范围、厚度变化、地下地形和油藏的非均质性(岩石特性的变化),正因为如此,才发展了提高采收率的方法设计。

本文将为工程人员、地质人员、测量人员和管理人员讲述地震技术的基本知识、应用与局限性,及由于分辨率不够而造成的缺陷。这些知识将作为学习前缘技术的基础,比如高分辨率地层成像,划定油藏边界、油藏特征描述,以及预测钻头前方的地层情况。这些技术将通过一些实例进行说明。

本书包括大量的应用实例以培训所有石油类专业人员以及勘探与开发方面的管理者。内容按时间先后组织,还包括一些实例。本书删去了大量很难看懂的数学公式,用简单通俗的语言讲清复杂的地震原理,使任何人都可以没有困难弄懂它。在每章的结尾,你都会发现一些关键词,这些关键词将帮助读者通过查书尾的术语汇编更好地理解该章内容。对于那些对更多细节感兴趣的读者,可参考针对个别章节的附录,附录中包括更多的理论和数学原理。另外为想进一步研究的人准备了非常完整的参考文献。

编者

2000.5

目 录

第一章 绪论	1
第二章 地球物理技术回顾	5
第一节 概述	5
第二节 地震方法	5
第三节 总结和讨论	7
第三章 地震勘探的基本原理	8
第一节 地震波的传播	8
第二节 波前和射线	8
第三节 波动理论	9
第四节 反射波和透射波	10
第五节 勘探地震学的传播模型	12
第六节 总结和讨论	13
参考文献	13
第四章 地震数据采集	15
第一节 野外地震数据采集	15
第二节 数据采集系统的组成	17
第三节 海上地震数据采集	22
第四节 总结和讨论	25
参考文献	25
第五章 地震数据处理	27
第一节 引言	27
第二节 信号理论	30
第三节 正常时差(NMO)	36
第四节 速度分析	37
第五节 切除	45
第六节 静校正	47
第七节 叠加	54
第八节 数据处理的目标	55
第九节 数据处理流程综述	56
第十节 总结和讨论	57
参考文献	58
第六章 偏移	60
第一节 引言	60

第二节	垂直入射（法向入射）	60
第三节	总结和讨论	68
参考文献		69
第七章	模型	71
第一节	引言	71
第二节	合成地震记录的用途	71
第三节	声阻抗	72
第四节	制作合成地震记录	72
第五节	模型数据的采集和处理	77
第六节	二维模型的几种类型	80
第七节	结论	83
第八节	总结和讨论	83
参考文献		83
第八章	垂直地震剖面	85
第一节	历史回顾	85
第二节	VSP 的概念	85
第三节	野外仪器设备与所需的物理环境	86
第四节	VSP 的噪声	89
第五节	VSP 野外施工步骤	91
第六节	上行波和下行波的分离	92
第七节	数据增强处理	94
第八节	VSP 的应用	94
第九节	总结和讨论	104
参考文献		105
第九章	AVO 技术及应用	108
第一节	引言	108
第二节	原理	108
第三节	AVO 属性剖面	110
第四节	AVO 资料处理	112
第五节	AVO 解释及应用	114
第六节	结论	125
参考文献		125
第十章	三维地震勘探	126
第一节	引言	126
第二节	何时、何地以及为什么使用三维地震	126
第三节	三维资料的采集	127
第四节	三维地震观测系统的设计回顾	128
第五节	二维地震设计	128

第六节	三维地震勘探的设计	130
第七节	三维资料处理	135
第八节	三维地震资料的应用	135
第九节	总结和讨论	142
	参考文献	142
第十一章	层析成像	144
第一节	引言	144
第二节	地震层析成像的几种类型	144
第三节	旅行时层析成像的步骤	145
第四节	透射层析成像	146
第五节	层析成像模型的例子	147
第六节	迭代层析偏移成像处理	148
第七节	误差准则的选择	152
第八节	地震层析成像和储层特性	153
第九节	最新进展	154
第十节	在石油工程中的应用	158
第十一节	总结和讨论	158
	参考文献	158
第十二章	等值线图 and 绘制等值线图	161
第一节	地下构造等高线图	161
第二节	等时线和等厚线图	165
第三节	人机交互解释	167
	参考文献	167
第十三章	高分辨率地震勘探技术	169
	引言	169
第一节	分辨率的定义	169
第二节	影响分辨率的主要因素	170
第三节	高分辨率地震采集	171
第四节	高分辨率地震处理技术	172
第五节	高分辨率地层解释技术	178
第六节	高分辨率地震解释技术应用实例及其效果	180
第七节	结束语	181
	参考文献	181
第十四章	储层岩性及含油气预测	183
第一节	薄互层地震反射特征分析及储层预测	183
第二节	利用速度资料预测岩性	189
第三节	双临界 DIVA 地震岩性预测	192
第四节	广义线性反演 (GLI) 及宽带约束反演 (BCI) 地层岩性	194

第五节	地震参数解释的模糊聚类识别法	198
第六节	利用地震波动力学参数预测地层岩性	202
第七节	基于神经网络的油气预测系统	206
参考文献		211
第十五章	实例与应用	212
第一节	AVO 地震响应具有岩性信息吗?	212
第二节	联合应用三维地震——计算机辅助勘探加速了阿拉巴马 N. FRISCO 市油田的开发	222
第三节	高效益的 3D 地震勘探设计	227
第四节	层析成像在井孔中及反射地震学中的应用	237
第五节	联合应用多学科方法获得成功: 一个实例	243
第六节	应用地震—地质相结合的方法, 较好地进行了薄油层复杂岩性油藏 的砂体预测	249
第七节	地质建模在油藏精细地质研究中开发应用	250
第八节	宋芳屯油田芳 148 区块薄油层储层横向预测技术应用研究	259
第九节	储层开发中的地球科学——一个沉睡的巨人	264
第十六章	结论	268
附录 A		269
附录 B		270
术语汇编		272

第一章 绪 论

油田中流行一句话：油就在你寻找之处。这意味着钻头是主要的勘探工具。在过去，情形确实如此，结果找油的成功率很低。然而，地球科学的发展已经改变了所有这一切。现在勘探技术涉及到现代技术的许多方面，而这些技术在 50 年以前只能是梦想。然而，由于在勘探和开发各个阶段，每一个工作人员对这些技术缺乏认识 and 了解，这些方法的最大潜力还没有发挥出来。

石油勘探和开发中所用的技术并不都是常规的。作为地质人员，我们需要想象。作为地球物理工作人员，我们仍要想象。作为工程人员我们要预测并估计其未知的情况。尽管地质人员使用某种地下信息控制和分析储层，并标定目标，他们仍需要想象。所以人们说：石油就在地质人员的脑子里。

地球物理人员需要从地表的情况想象地下深部的情况，并逐步细化他们的想象。地质人员和地球物理人员协同工作、改变各自固有的观念，使他们的努力能够达到最佳的效果，能产生一个地质上和地球物理上都合理的（经济上也是可行的）计划吗？工程人员为在钻探井之前进行的产量预测需要有关储层特征的信息吗？工程人员需要考虑远景区的经济因素吗？如：储层厚度、孔隙度、饱和度、采收率和其他参数。正常来说，钻探井是勘探部的责任。然而甚至在勘探部内部，地质人员和地球物理人员也并不经常交流。通常，地质人员和地球物理人员独立进行各自的解释工作。直到最近，才有几家石油公司采取了协作观点，以便两种成果更好地交流与结合。

现在让我们讨论一下操作方面的问题，即钻井。地质人员已经决定钻构造高点。可能地球物理人员根据地震数据也参与了这一决定，他们给钻井工程人员提供井位，要取多深的岩心及其他参数，钻井工程人员则设计一个应用于整个工区的合理的钻井方案。

地震剖面上，某一确定的勘探深度上的异常可能表明异常高压区的存在。工程人员必须准备通过下套管或者通过增加泥浆比重控制这种高压区。在浅部地层的钻井中，直到发生了井喷，地震剖面上的很多高振幅异常才得到重视。

如果地质人员和工程人员无法确定异常类型，可以让地球物理人员在钻头达到高压区前进行 VSP 处理，这将有助于预测钻头前方的地质体及高压区的深度，进行这样的处理会停工很长时间吗？但不管多长时间，这肯定要比井喷并毁经济得多。此外，地质人员和地球物理人员能更好地得到下一标准层的信息，并能检查他们的钻井计划。

迄今为止，各部门均受益于地质人员和地球物理人员观点的沟通与交流。如果钻井已经完成，我们可能面对两种结果。（1）干井（无油）或仅为边际低效井；（2）油井，则我们将加速完井并开发这个油田。

通常说来，此时勘探部的任务已经完成，它将开始寻找新的初探井远景区，地质人员继续研究钻井记录、地球物理人员继续研究剖面 and 波形。开发工程人员和开发地质人员，或储层地质人员和工程人员将重新圈闭探井所发现的油田范围，进行计算并确定井数及井

的间距来开发这个油田。

钻井工程人员将开始它的工作，通常除每天的钻井报告和偶尔的交流外，操作部和开发部之间没有信息交流。除日常的工作和事务外，两部门的工作人员之间也没有进行明智的交流以便改进工作和交流思想、促进他们更好的解决问题。

通常情况下，如果（储量）探明井见油，钻机将不断移到其他位置，直到钻到干井。这样，我们就可以定义油藏边界，尽管很可能超出油藏范围。若探明井为干井，其结果将是令人沮丧的。某部门应当承担责任，可能是勘探部没完成好工作，我们可能在一个施工质量不好的、不够密的地震测网上钻的井，也可能钻在断层的下盘上。经历此事件后，我们将以更密的地震数据来确定构造的界限，并希望确定在下一个钻井位置时，不会有什么意外的情况发生。

我们考虑更密的二维地震测网或三维勘探吗？为什么三维比二维更好呢？使用密测网二维勘探，它能起到与三维勘探同样的作用吗？多密的地震网格能满足我们期待的要求？自所有的数据移交给开发部起，地球物理人员和勘探地质人员给开发部再继续做过什么工作吗？答案很可能是“不”，只因为那不是勘探部的责任。勘探部的责任是找到另一个可能成功的初探井远景区。在开发部门我们还需要有一个地球物理人员来完成勘探部地球物理人员所做的工作吗？我们是否缺乏两种工作人员之间明智的交流及观点的交换？答案可能是“是”。

现在让我们回到正题上来，油田已经开发，一次采油产量在下降，我们准备提高采收率，现在我们需要收集更多的关于渗透率，饱和度和其他的横向变化特征的信息。如果能得到一些垂向上的更多的信息，对提高采收率将会更有帮助。

我们怎么能从油田中间隔 100m 远的 5 或 10 口井中得到这些信息呢？我们将在井间内插或外推吗？用井间的最佳推测吗？或者我们能找到其他的方法来得到储层在垂向和横向的变化特征的更好图像吗？

我们早就知道储层岩石是不均匀的。假定储层特性具有均匀性是冒险的假设。所以我们肯定需要给储层成像。我们需要给微小的地质体、薄互层成像，并给出它们的几何形状及其储层特征。如果我们能更好地分辨储层，利用大量的钻井就能采出更多的原油。如果我们在井中置入一个震源和接收器，震源激发后，记录高频信息用来描述薄互层及其特性，我们就可以做到这一点。如果我们利用反演或层析成像把地震速度与储层特性联系起来，如果我们大家一起交流，为一个目标工作而找到正确的答案（不管是谁找到的），我们就可以做得更好。关键在于通过交流和讨论，并把不同工作人员的知识结合在一起。

对于所有应用于石油技术的现代科学来说，石油勘探和开发与其他应用科学一样包含许多艺术。一项方案最初可能只是地质人员的想象，但经济上的成功可能取决于地球物理人员和工程人员的贡献，以及每一工作人员正确地解释他所拥有的数据的能力。解释人员的技术和经验将影响到数据的使用效率。如果这些人中的任何人无法正确应用自己的知识，无法使他人的经验与自己的经验结合，都可能导致经济上的灾难。我们（作为地球科学人员）怎样才能阻止这样的灾难发生？答案是：通过彼此交流，充分利用每一种工作人员的专业知识。我们相互学习对方的技术，彼此传授知识以便能了解所有学科的价值、潜力及局限性，以便更有效地交流。然后我们可以朝着一个为找到更多石油的目标共同努力。

由于目前油价不稳定，钻初探井的水平低，所以必须减少勘探风险。通过利用井眼地震测量更好地描述储层特性，储层地球物理学在帮助石油生产者提高油田采收率方面起到了重要的作用。

地震勘探对地质勘探的价值是众所周知的。然而，工程人员怀疑地震数据是否有足够的分辨能力以帮助储层开发。在一段时间内，这种怀疑是正确的。但是，如 VSP，三维地震勘测、层析成像及充分改进的数据处理技术正在改变这种观点，监视提高采收率是地震技术对油气生产的一个重要应用。

地震学，像我们在油田中应用的其他方法一样，有它的局限性。地震数据必须与其他信息和方法共同使用以增加可信度，把风险降到最小。所有这些方法都与地区有关，一种方法可能在此区效果甚佳，而在彼区则失败。

石油工业的未来不仅在于发现新储量，而且在于从目前储量中尽可能地开采，所有的地质、地球物理、工程信息应当结合到一起来开发地下所有可能的储量。其关键在于了解他人的技术，建立明智的交流，以缩短不同学科工作人员之间的距离。

让我们研究一张地震记录，图 1-1，此地震剖面是一个地球切面的声波成像。垂直轴以时间（毫秒）为刻度，总时间通常为几秒的数量级。如果我们知道地层速度，毫秒刻度可被转变成深度，水平轴以英尺为单位，以典型的 200 英尺（60m）为样点间隔。

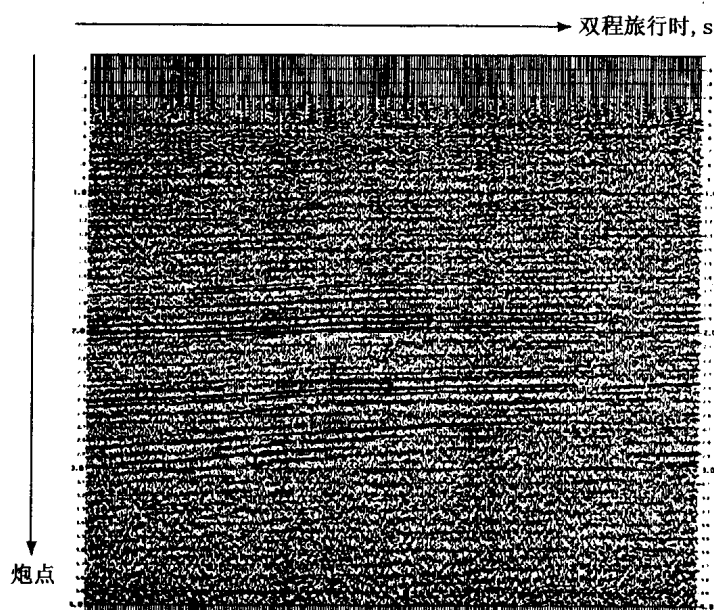


图 1-1 地震剖面

通常认为，地震道上黑色区域代表岩石速度和密度的增加，在剖面上呈现正向脉冲（即正幅度）。信号振幅越高，速度和密度变化越大。反之，像泥岩这样的软岩石表现为速度和密度降低，在地震剖面上表现为负向幅度，显现为白色部分。

采样率间隔可以选择 1ms, 2ms 或 4ms（或更大间隔）等，通常以不限制垂向分辨率或能够分辨出薄互层的顶底为依据。在剖面上我们通常能看到斜坡、断层、背斜及不整合

的变化、横向上的变化和其他的岩石特征。任何图像，正如医学中的图像一样，我们所看到的图像的意义通常有点含糊，解释人员利用他的知识和经验对这些图像进行解释。

为了了解地震记录的意义，评价这些图像的效用，我们接下来先回顾一下地震波传播的基本物理知识。

第二章 地球物理技术回顾

第一节 引言

各种各样的地球物理勘探方法可用于陆地或海上。每种方法都测量与岩石的物理性质有关的一个参数。表 2-1 列出了不同的方法，它们所测量的参数及有关的岩石特性。

表 2-1 地球物理勘探方法

方 法	测量参数	有关物理特性
地震	反射（透射）地震波的旅行时	密度和弹性模量，它们决定地震数据的传播速度
重力	地球重力场强度的空间变化	密度
磁力	磁场强度的空间变化	磁化率和谐振
电阻率	地球电阻	电导率
感应极化	频率相关的地下电阻	电容
自然电位	电位	电导率
电磁	电磁辐射响应	电导率和电感

从表中可以看出，特定的方法所反映的物理特性决定了那种方法的适用范围。例如，磁法勘探适用于确定埋深的磁矿体。类似地，地震勘探和电法勘探适用于确定地下水位，含水岩石具有高的地震速度和高的电阻率，因而可以将水饱和岩石与干燥的岩石区分开。

各种地球物理方法通常联合使用。例如：在大陆架地区初次找油，通常是联合使用重力、磁法和地震勘探方法。

第二节 地震方法

目前最完善的、最昂贵的、最有效的勘探方法当属地震方法。

正如前面所讨论的，应用重力和磁法进行普查以确定有利区。而在有利区，地震方法可以具体确定地下地质体的一些细节。地震勘探通常用透射法或反射法进行。

透射法的优点在于：在声速已知的假设情况下，能够给解释人员提供数据来确定地层单元。透射法勘探，作为一种能确定深部的高速碳酸岩和蒸发岩岩石结构的方法，最近已日益被重视。同样的地质情况，反射法勘探就无法得出相同质量的数据。

反射法是确定岩层顶面的最成功的地震方法，应用也最广，在下面的部分将对这种方法进行详细讨论。

一、地震记录

在讨论地震的基本原理之前，先熟悉一下地震道、地震记录及地震剖面的概念。

地震道或波形道（见图 2-1）就是检波器记录的地震能量引起地壳运动的响应。波形道的每一部分都有意义，或者是来自地下某层岩石的反射能量或透射能量，或者是某种噪音。地震道上波形偏离中心线的部分形成波峰和波谷，波峰代表正的信号电压，波谷代表负的信号电压。

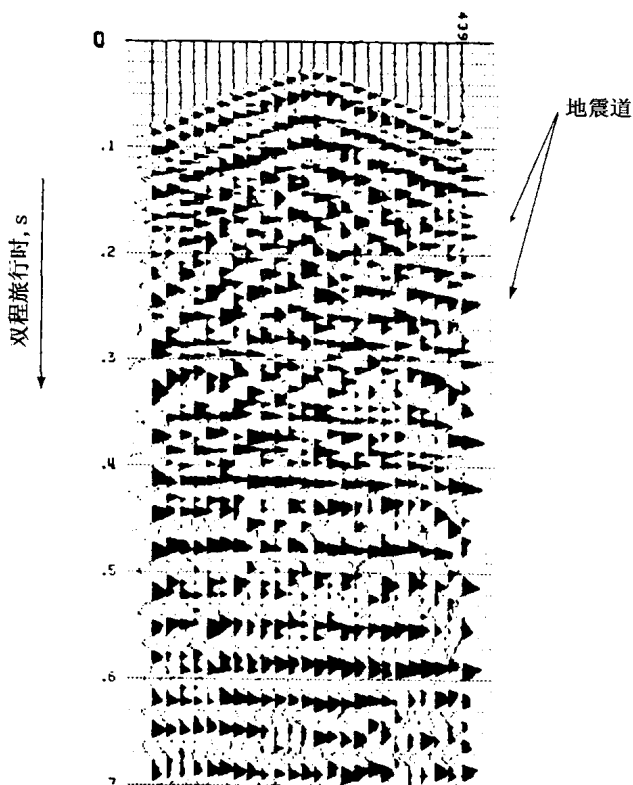


图 2-1 地震记录

地震测量共炮点记录是一炮激发、很多检波器同时记录得来的所有波形道的并列排列，波峰朝右并涂以黑色以使波形更明显、记录最上部时间为 0，向下时间增大（见图 2-1），此记录为地下一局部地区的原始剖面，包括噪音和其他的信号畸变。

地震勘探在研究区内获得大量的炮点记录，对数据进行很多步骤的处理以增强信号，压制噪音，提高分辨率，把应于地下某一深度点的所有道叠加成一道，称为共深度点叠加（图 2-2）。

二、地震剖面

处理完成后，所有的共深度点道集叠加并列排列构成地震剖面，这就是地震勘探的最终成果，剖面是反映地下信息的图像，可被用作钻井规划和开发规划，图 2-2 剖面显示很多岩层和一个潜在含油气构造。

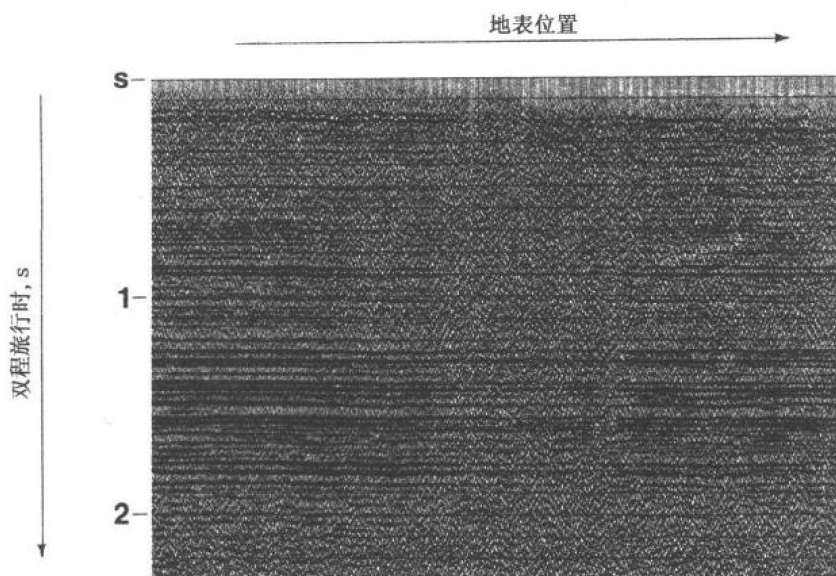


图 2-2 地震剖面

第三节 总结和讨论

本章简单回顾了应用于石油勘探和开发的地球物理方法。

在普查中用重力和磁法确定目标区中的有利区，这一步应在地震勘探之前（或同时）进行。

由于不断要求提高分辨以及基于 3D 测量能获取更多信息，一些记录系统已能记录多达 1024 道。生产者正致力于研究一种能记录多达 19000 道的记录系统。

地震技术正不断发展，需要找到更多的油气，和发现储层的细微性质，这要求更精确的信息以便研究储层的细节。

第三章 地震勘探的基本原理

第一节 地震波的传播

追踪向地下传播的地震脉冲是非常困难的，由于问题的复杂性，这也许是不可能的。因此，我们追踪的是通过大大简化的地下模型的脉冲。即使采用简单的模型，我们也面临着难于解决的一些问题。因此，基于这些简单模型发展了很多野外技术和处理方法。为了了解怎样追踪地震脉冲，我们首先要建立一些指导性的理论并讨论一些简化的地球模型。

尽管声波传播是一种复杂的现象，声波传播的原理我们还相当熟悉。就像往静水中投入一个小鹅卵石，当石头击打水面，我们观察到涟漪是以圆的形式从中心向远处传播，直径越来越大。如果我们仔细观察，就会看到水滴只是在垂向上运动并带动邻近的粒子运动，而后再回到原来的位置，相邻的水粒子间连续的、逐渐向前运动的传递就是振动传播。在垂直面上我们可得到同样的过程。波的传播是一种三维现象。

地震波传播的原理与刚才讨论的过程基本相同。当我们借助于炸药震源或振动震源将地震能量引入地下时。能量就开始以逐渐扩展的球面形式通过地下介质传播。如果我们能在任何时候给传播的地震波的运动照相，我们就能观察到波的运动远离了中心。能量的前缘被称为波前，地震波借助于这些波前以三维形式向前传播。

第二节 波前和射线

如果我们从震源出发，用直线连接相继的波前上相等的点，就可以得到波传播的直接描述。连线形成射线，射线是三维现象的一种简单的表达方式。记住，当使用射线图时，我们是指波沿一特定的方向传播，也就是说，在所有点上，波前均垂直于射线（见图 3-1）。

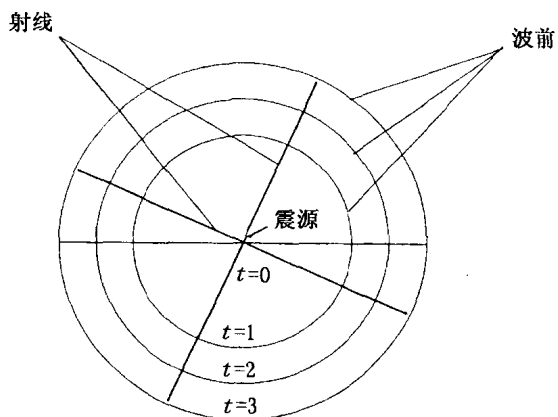


图 3-1 波前和射线

波前是震源激发并以球面形式向外扩散的能量射线是代表波前传播的方向线，并垂直于波前

第三节 波动理论

波动理论解释了同相轴、旅行时、波的运动形式和形状。在地下，当波动理论应用于地震能量时，波动理论是非常复杂的。只有当应用于简化的模型时我们才能理解这种现象。

最简单的模型是把地球当作均匀的、无限大的、由无穷小的立方体组成的弹性固体，波动方程研究每个立方体的应力和应变及从立方体到立方体间应力和应变传递。

波前是由震源发射且能量向外扩展的球面。

射线是代表波前传播方向的线，垂直于波前。

根据波动方程理论，波的运动有很多种类型。我们所要检测的主要能量是纵波（P波），其特点为介质中粒子的振动是沿着波传播的方向。横波所包含的信息也是重要的，其特点为粒子的振动与传播方向垂直，这一点很像水面上的涟漪的运动。图 3-2 示意横波与纵波的特征。

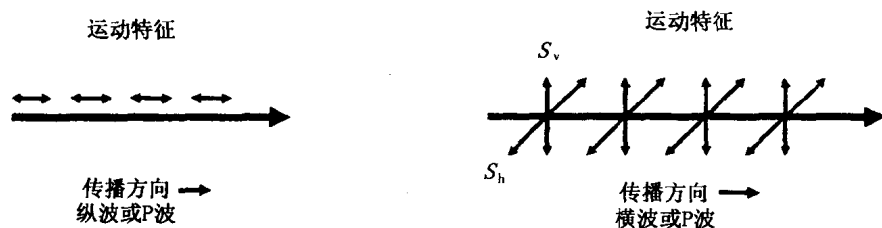


图 3-2 纵波和横波

在不同性质介质的界面上，有一种更复杂的传播形式。其中一种称为面波，主要是在界面附近传播。面波中的一种叫瑞利波，表现为一种逆椭圆形的运动。这种波可被记录在地震剖面上，称为地滚波（见图 3-3）。

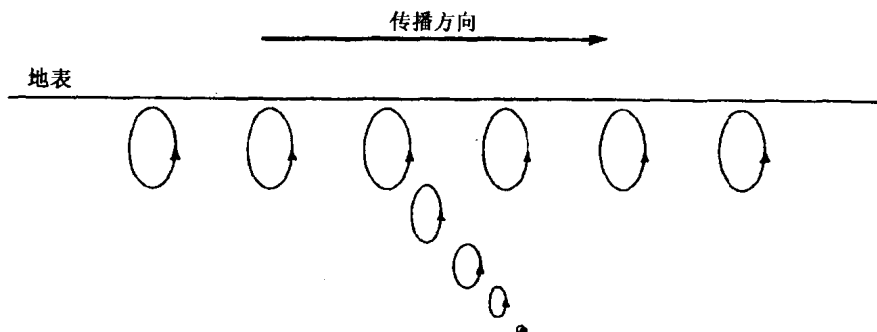


图 3-3 瑞利波（地滚波）

质点是以椭圆形、后退方式运动，也就是说，椭圆的顶部向源方向运动，运动幅度随深度增加而降低