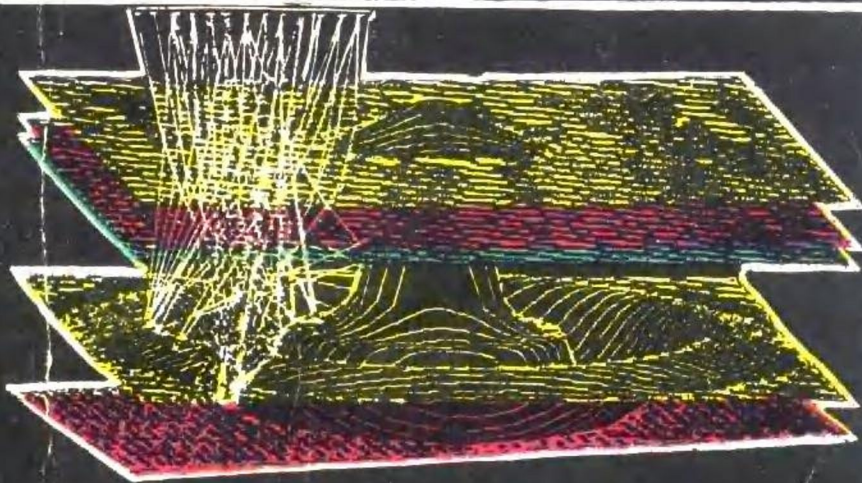


【美】H. R. 纳尔逊 著



勘探地球物理新技术

石油工业出版社

P631

022

27509

勘探地球物理新技术

〔美〕H. R. 纳尔逊 著

陆邦干 范伟粹 等译

5436/07

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在对反射地震学的基本原理做了简述后,分别介绍了资料采集、处理、数据的模型模拟、人机联作计算机图示、综合解释等方面的新技术及发展动向。本书是专门为石油勘探的经理人员写的,内容深入浅出,通俗易懂,对一般地球物理勘探人员也有一定的参考价值。

第一章由范伟粹、赵亚明译,第二章由范伟粹译,第三章由陈效期译,第四章由陈乾元译,第五章由刘庚辰译,第六章由俞寿朋译,第七、八章由张德忠译,第九章由方云飞译,第十章由王宏林译,第十一章由陆邦干译,全书由陆邦干、范伟粹校订。

H. Roice Nelson, Jr.

New Technologies in Exploration Geophysics

Gulf Publishing Company 1983

勘探地球物理新技术

〔美〕H. R. 纳尔逊

陆邦干 范伟粹 等译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲 8 号)

煤炭出版社印刷厂排版

涿县范阳印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 7³/₈。印张 51插页 162千字印 1—2,000

1986年10月北京第 1 版 1986年10月北京第 1 次印刷

书号: 15037·2608 定价: 2.05元

前 言

本书企图对当前油气勘探的新技术进行总结，并预测其发展前景。书的名称是勘探地球物理，因为所述的新技术都是用地球物理方法定量地研究地球的。这是地球物理学的基本定义。在此定义下有许多专业，其中最普遍的是反射地震学。也许，本书更恰当的名称应是：“勘探地震学的新技术”，但是地震学这个名词，地球物理学家实际上很少应用。

这本书是专门为石油勘探的经理人员写的，他们已经发现自己有些跟不上新技术的发展，而这些新技术对他们作出决定是有影响的。书中对地震资料采集、处理、及解释的每一个主要领域的新技术都作了一番综合的回顾。大学生们、新进的地球物理学家、有经验的勘探人员等如对本书的某些领域不太了解，看完后将会发现它是值得一读的，著者希望这些内容至少对他们近十年内的工作会产生重大影响。

由于过去大部分的新发展都是在采集与处理领域内完成的，所以本书着重叙述了有关地震解释的新技术。解释工作过去一直是用彩色铅笔来完成的，与五十年代相比基本一样。可以预测在八十年代中，解释领域和其它领域一样，也会发生重大的变化。目前，在直接碳氢检测（亮点分析）与地震地层学方面已取得了重大进展。但其有关内容已有其他著作论述，因此本书将着重预测人机联作计算机图象终端对地震解释的影响。强调这一方面的另一个原因是，著者本人曾经是一个解释人员。

本书的编排次序与地震作业的步骤一致：基本原理学习、资料采集、处理、数据的模型模拟，计算机对成果的汇集与显示，以及最终为了确定地下地质情况的综合解释。第一章引言部分对反射地震学的基本原理进行了回顾。它是专为非本专业的勘探经理写的，用非数学的方式介绍了本专业。第二章对本书述及的新技术进行综述。第三、四章着重介绍采集新技术(遥测与多道采集系统及三维技术)。地震资料处理是所有领域中发展最快的部分，其最重大的发展是计算机计算速度的增长及新的数学模型技术。第五、六章对此作了介绍。使用新的计算机图象设备将对地震资料在所有上述三个领域内的应用发生重大影响。第七、八章回顾了计算机控制的资料显示技术。第九、十章对解释技术，特别是综合地球物理解释所需的人机联作解释技术进行了分析。最后一章讨论了大学与工业界联合进行人材培训问题，以将上述新技术应用于勘探地球物理。

本书并不企图对不同的产品系列进行比较，也不想推荐同类产品中哪一种是最好的。书中提出公司及产品名称的目的，仅仅是为了举出一些产品实例，以便讨论。例如，目前制造图象终端的厂商有几百家，本书所以只提到某些产品的原因仅仅是因为本人对它们比较熟悉。在某些情况下，例如第一章(反射地震学介绍)、第六章(数学与物理模型)中，当在回顾其发展史时，很可能漏掉某些项目及其发明者。为此本人预先致以歉意。本书中也可能遗漏了某些新技术。如读者希望进行更正或提出他们本人在这些领域的新贡献，请告知著者。如出版条件许可，其内容将会在再版时加入。

H. R. 纳尔逊
德克萨斯州 休斯敦

目 录

前言

一、反射地震学——引言.....	1
二、勘探地球物理技术发展动向.....	62
三、多道地震记录系统.....	78
四、三维地震技术.....	91
五、向量计算机.....	102
六、数值模型和物理模型.....	115
七、人机联作计算机图示.....	141
八、真正的三维显示设备.....	160
九、人机联作解释.....	179
十、数据库的管理.....	196
十一、企业与大学合作培训勘探工作者.....	212

一、反射地震学——引言

反射地震学的原理象使用反射镜一样简单。本章将介绍其基本概念与主要定义，并分为基本原理、地震资料采集、处理和解释几部分。为了对本学科进行一番非数学的综述，对很多专题都只是一带而过或合并叙述。本章的主要目的是为使不具有大学毕业数学水平的人阅读本书其他章节打下基础，也是为了那些对地球物理懂得很少的人而写的，帮助他们建立一些基本概念。同时也是为了那些非专业的行政管理人员写的，他们希望能了解勘探地球物理找油找气的原理与方法，并弄懂反射地震学与本书其后章节所述各种新技术的关系。

地球物理学的主要用途是研究地下地质情况，以提高油气钻探的成功率。此外，反射地震学还有很多其他用途：寻找煤层，找地热源，为公路建设与建筑物研究表层地质情况等。地球物理学一般还包括：重磁力测量、电感应方法、磁大地电流、地震折射、天然地震、地球化学勘探、卫星图象等。作者并不企图贬低其他各种技术的重要性，但也不对它们进行详述。本书的重点是反射地震学。虽然，书中所述及的各种新技术的应用范围并不仅限于地震领域，但在其他领域的应用，将留待读者去完成。所以要强调反射地震方法，是因为它占了地球物理勘探投资95%以上。该领域所拥有的地球物理学家人数，大致也占有同样的比例。它与石油天然气工业的密切关系，现今社会对能源的依赖程度，这都是本书

着重强调反射法的主要原因。

1. 基本原理

反射地震法是研究由地下地质界面反射来的地震波的一种方法。其原理非常简单，就象我们已知空气中声波的速度，用测量井底的回声时间以得出大直径水井的深度一样。使用爆炸或其他方法在地表激发一个声波，它在均匀介质中只向下传播。由于不同的地层，其速度、密度亦不相同，就会在地层界面上产生反射波，这如同回声一样。反射地震法所测量的是从人工震源到地下反射界面，再回到检波器的双程旅行时间。

地震波波前的传播过程可如图1-1以射线简化表示。这些射线均服从斯奈尔定律，该定律规定入射角等于反射角，并可预测折射方向的变化。入射角即射线与地层界面垂线的夹角。如果地层水平或近似水平，则反射能量将返回所要测量的地面位置，并可测出至该层的旅行时间。沉积岩原来都是近似水平地沉积的，然而在以后的地质时代中其形状可能有所变化。

沉积岩在沉积过程中形成了具有不同物性、厚度的地层。值得注意的是圈闭油气的沉积部位。层状地层是由经历了不同程度压实作用的各种物质所组成。影响地震波传播的主要因素是声波在岩层中的速度及其密度。速度与密度的乘积称为声阻抗。在两个具有不同声阻抗的地层界面处，从上一层向下传播的一部分能量反射回地面，其大部分能量将继续下传，并产生折射弯曲，如图1-1A及B所示。

反射能量的大小由两相邻地层的声阻抗差所决定。反射振幅与入射振幅之比称之为该界面的反射系数^[1]。反射能量的振幅与上下两层声阻抗之差成正比。反射系数既可能为

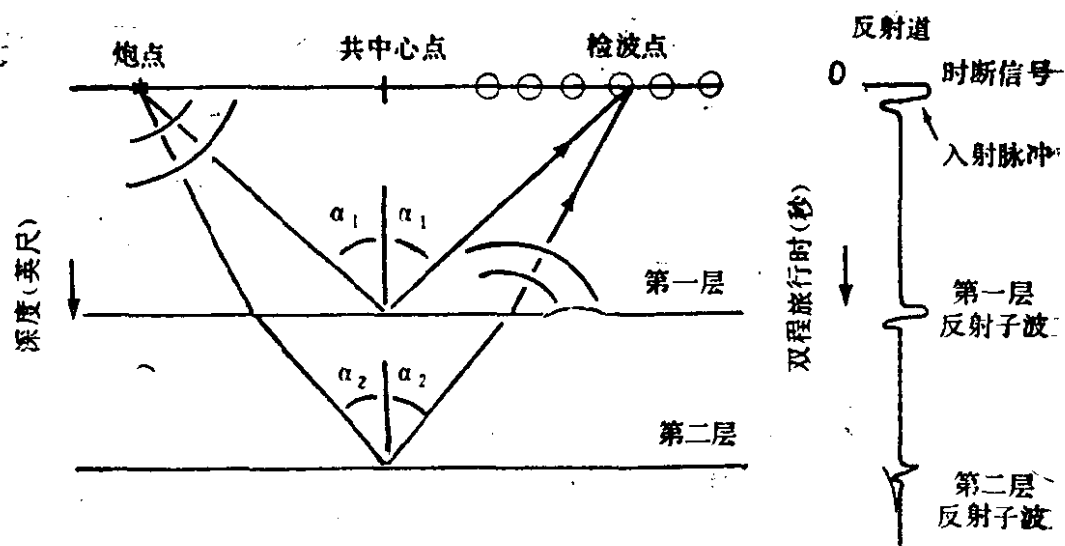


图 1-1 A 说明共中心点法 (CMP) 的基本概念。注意地下界面可以作为新波前射线的源，入射角等于反射角

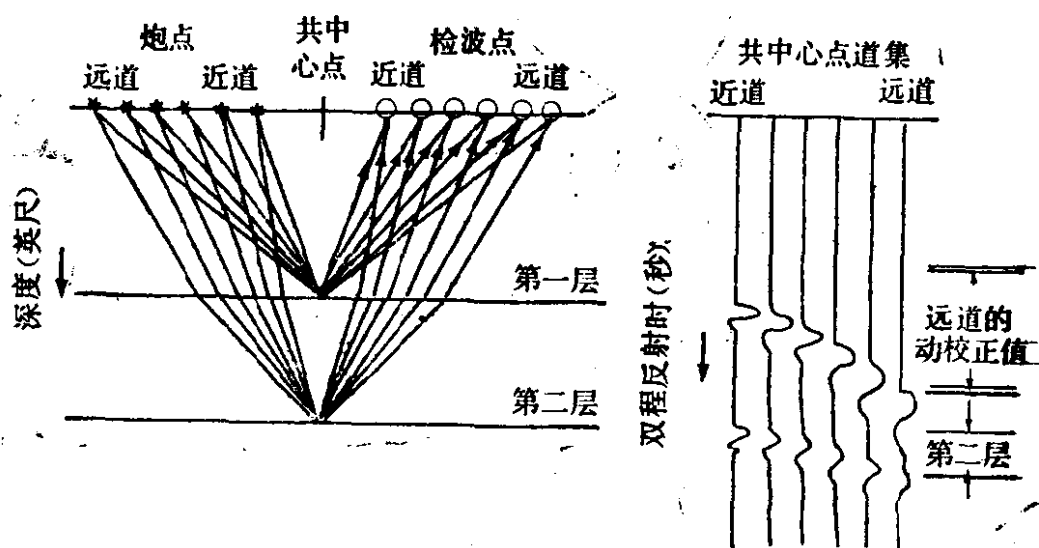


图 1-1 B 在该共中心点道集中，反射波由六对震源—检波器组合构成记录。资料在处理时抽成共中心点道集。波散现象，或子波随着偏移距而拉长的现象，在图的右侧加以夸大表示

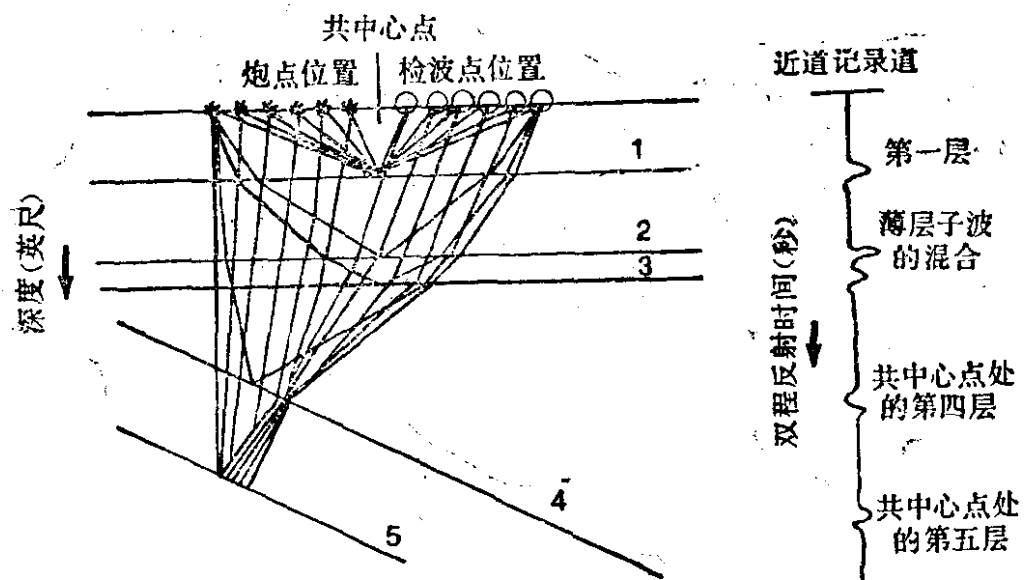


图 1-1C 倾斜界面的共中心点道集，说明共中心点法中的一个问题。不仅4、5层的射线轨迹反射点是与共中心点的位置不一致，而且应注意第5层不同震源—检波器组合的地下反射点的位置随着炮检距而变化

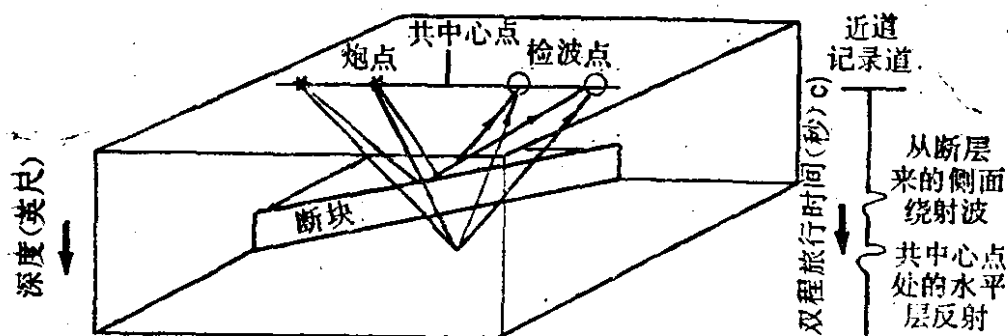


图 1-1D 从陡倾界面来的侧面反射。本例说明从一个断块所产生的绕射波形成一个中心点道上的侧面波

正值，也可能为负值，如图1-2所示。地下各界面的反射系数一般为0.001~0.1，当遇到海底或浅层含气砂岩时，其值可达0.3。

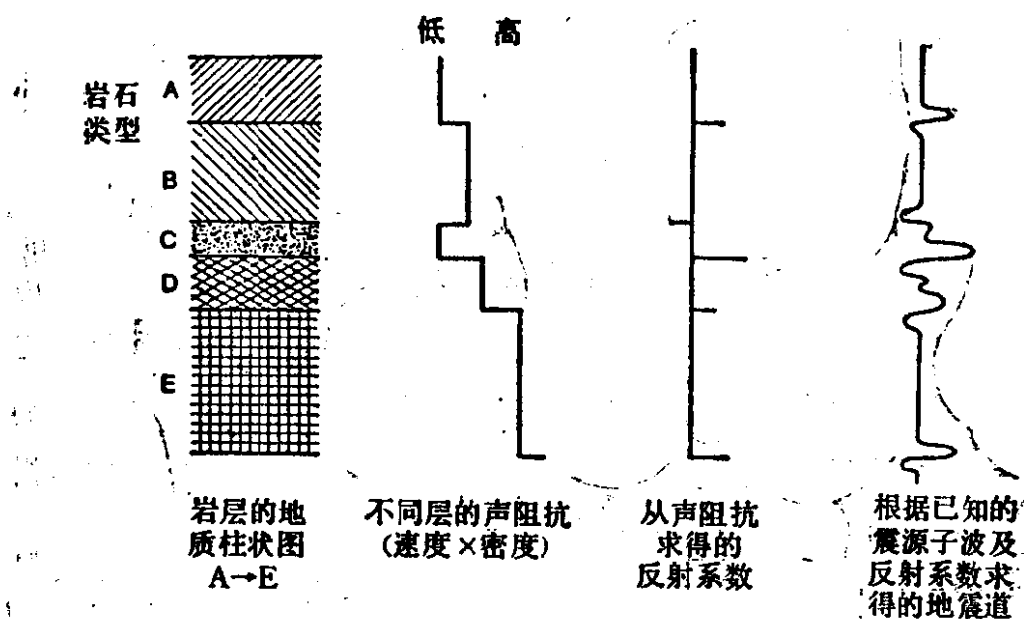


图 1-2 地质柱状图与反射系数间的关系(根据MoDonald、Gardner、Morris)

继续下传的地震波产生折射或弯曲，正如光线在水中的弯曲一样。当地震波通过两个各向同性介质的分界面时，地震波改变方向，其入射角正弦与上层介质速度之比等于折射角正弦与下层介质速度之比，由于沉积岩一般是成层沉积，其速度与密度也一般都向下递增，因此应用上述基本原理去研究地下地质情况应该是很容易的。

但是，地震波的激发，记录及研究由于受若干因素的影响而复杂化。其结果往往不象上述讨论那样直观。对传播地震波而言，大地可能是一种很复杂的介质。用一个人工震源在激发地震波时，大地这一弹性波系统受其激励而产生振动，因此从地表复杂的运动中辨认真反射可能是很困难的〔2〕。震源所发出的地震波并不是一个脉冲样的波，地质界面处一般是渐变，而不是突变的，反射系数往往很小，地

层一般也很薄，以致同一地层的顶界与底界的反射往往会互相干涉。

为了研究地震资料必须作出若干假设。其中之一，是假设当地震波向下发送并反射回来由地面检波器接收时，在震源与检波器的中间存在着一个很重要的空间位置，这个空间位置代表地下产生反射位置的地面投影。一般称此中心位置为共深度点（CDP），在本书中称之为共中心点（CMP），共中心点的概念如图1-1所示。注意共中心点的假设对于水平的层状地层是正确的（图1-1A与B），但对于倾斜地层则不然（图1-1C）。当测线侧面有构造时，有时会产生侧面反射（图1-1D）。由于大多数地层是倾斜层，所以也会产生侧面反射波。由此可见，共中心点的假设前提并不总是成立的，但实践证明，根据这一假设，在大多数情况下都已很成功地进行了采集与处理。使用面积或三维地震技术，可以进一步改进地下情况的地震成像。

共中心点法是贝蒂地球物理公司的Harry Mayne在1950年前后提出的，并已证明，在干扰很严重的地区既能压制干扰又不致影响有效反射。随后，它又成为一种压制地质剖面中多次波的好方法，还是一种可以得出可解释的、反映地下地质情况的垂直横剖面图的采集与处理方法。每放一炮，用很多检波器进行接收。多年以来，标准的地震道数一直为24道，但今天一个标准的地震队每炮至少用48道排成一条直线接收。每放完一炮并取得记录后地震道向前滚动（把后面接收站上的检波器收起来，并把它们移至前面的接收站上），如此地震测线就往前移动。陆上队检波器的滚动情况，就象坦克车上的履带一样。

共中心点法处理的第一步是抽共中心点道集，（把具有

同一共中心点的不同的震源—检波器组合集中在一起），如图1-1B所示。在同一共中心点道集中，随着震源—检波器距离的不断增加，地震波的到达时间逐渐延迟。（所记录的反射振幅—时间的波形道有点象一个“扭动道”或调幅的正弦波）。从简单的几何图解可见，地震波到达地下同一反射点的射线路程，炮检距较远（震源到检波器间的距离）的道要比炮检距较近的道长。如果已知传播到该反射层又回到检波器的地震波的速度，则可算出较大炮检距道上地震波的到达延迟时间，并对之进行校正。校正后可使具有不同炮检距的所有道的到达时间对齐或“拉平”，此种使共中心点道集“拉平”的方法称之为正常时差（NMO）校正。将校正后的各道逐个样点相加，每个特定的共中心点就形成一个迭加道。由于多次波（这种波并不是来自一个新的地质界面，而是地震波前在同一地层内多次反射形成）的传播速度与一次波的速度不同，因此这种波动校正后不能拉平。从统计学观点分析，在一个共中心点道集中，对大多数道均不能同相相加的地震波（特别是随机噪音），在共中心点道集迭加后都会趋于消失，这就是为什么共中心点法能提高信噪比的原因。在实际的三维地质体中，使用共中心点法还有许多问题，迭后反射波由于受到侧面波（来自炮点线以外的倾斜地层的反射波）的干扰而畸变。

海上施工时，地震船拖着等浮电缆前进，电缆中有许多检波器，其组合方式各队不同。炮点距是船行速度与放炮时间间隔的函数，检波道距则由电缆中检波器组合群之间的间距决定。与陆上施工一样，其共中心点道集迭加后，也可以得出良好的地下剖面图，当沿着地层倾向放炮时，其效果就更好。但共中心点法还不能解决射线平面以外的反射波或侧面

反射问题。使用面积采集与处理方法，可以解决上述问题（见四）。

另一个假设前提是，每一个地质层位或其界面只产生一个单一的、简单的反射地震波。但由于若干原因，实际情况往往不然，例如，反射时会产生层间多次反射波及伴随波。根据惠更斯原理，前进中的波前上的每一点都可看作是一个新的波源，其后的波前是所有新波源波前面相切的包络（二维时它是一条曲线，三维时是一个曲面）。用三维的观点来分析此种波前面，可以看出，反射波实际上是由一块面积而不是一个点产生的。J. P. Wood用电火花物理模型试验证明了此种观点〔3〕。他用一个电火花发生器产生声波，使之在不同半径的圆盘及圆环上反射（见六）。改变圆环上圆孔的大小后，可以证明，反射面积对子波波形起决定性的作用。

不同地层内的岩石物理性质在三维空间内是变化的。在研究岩石的弹性时，如假设岩石是均匀各向同性的，则问题要简单得多。这就是说，不论沿着哪个方向去测量岩石物性，其性质都是一样的。实际情况并非如此。当震源子波向下传递遇到反射层返回地面时，其波形不断受到大地滤波的作用。在通常情况下，反射界面彼此靠得很近，各层反射子波彼此互相干涉，其波形与从单一界面上的反射大不相同〔4〕。研究上述反射波的型式（由沉积型式决定）及其波形的横向变化可以反映沿着该层面的地层变化，这门科学称为地震地层学〔5，6〕。

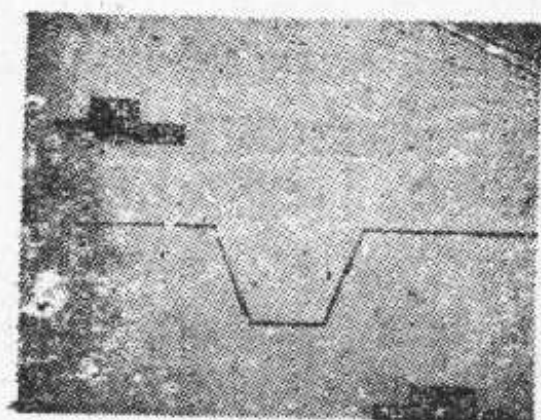
另一个有关因素是，地震波不仅是一种声波，而且是一个弹性波。因此，地震波不仅有纵波或压缩波（P波），而且也有横波或切变波（S波）。压缩波的性质与声波基本相同。大地对P波的期望响应特性，可以直接与声波相对比或

用物理模型及声波模拟出〔7〕。但若将切变波与压缩波一起考虑在内，则从一个简单模型所得到的各种反射，实际上是非常复杂的。见图1-3，图中是弹性地震波从一个简单的地堑的反射过程中的一系列瞬时快照〔8〕。切变波（内侧曲线）的传播速度大致为压缩波（外侧曲线）的1/2。综合分析纵波与横波资料有利于研究岩性〔9〕。因此，对野外记录方法要作专门的改进。

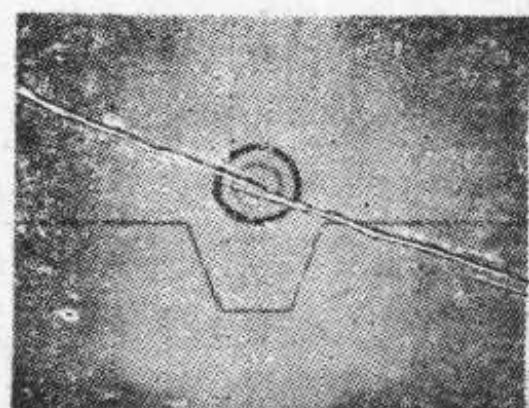
有关反射地震学假设前提中的另一问题的实例是波散现象。一般认为，从震源出发的地震波的波前是圆球形的，并在所有方向上是对称的。这意味着从震源出发的任何方向上，其波形都是一样的。但实际野外记录表明，同一层反射波的波形是炮检距的函数。畸变的原因，波散现象、多次波的干涉效应及反射系数随偏移距而变化。例如，同一层反射其近道的脉冲波的频率往往比远道高。这种子波拉伸是另一种未在假设条件中考虑到的问题。由此可见，反射地震法似乎并不是一种能源勘探的好方法，特别是其勘探费用，如与其它物探方法相比（如重磁法），则往往要贵得多。

那么，为什么这种既昂贵又有问题的方法还能如此普遍地得到应用呢？回答很简单，它们能帮助我们建立一幅地下地质情况精确的图象。特别与钻干井成本相比，此种方法是非常经济有效的。油气勘探中的关键问题是找到能圈闭烃类的地下圈闭。在反射法的使用初期，只用它来找大型地质构造，如背斜构造。由于烃类比水轻，它们常圈闭在局部构造的顶部，并储存在孔隙性地层中（即砂岩），其上覆层往往是致密的细粒地层（即页岩）。图1-4列出了用地震法寻找的四种典型圈闭型式〔10〕。

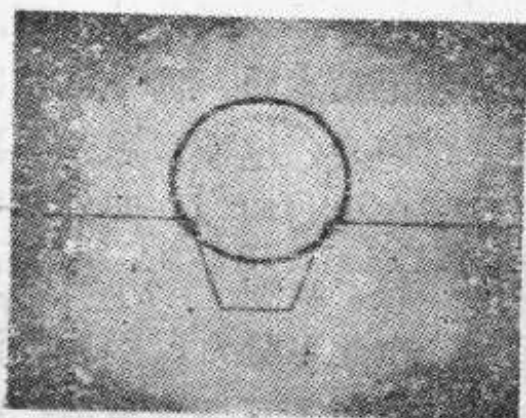
寻找油气时，一般都从一个测井资料计算所得的一维的



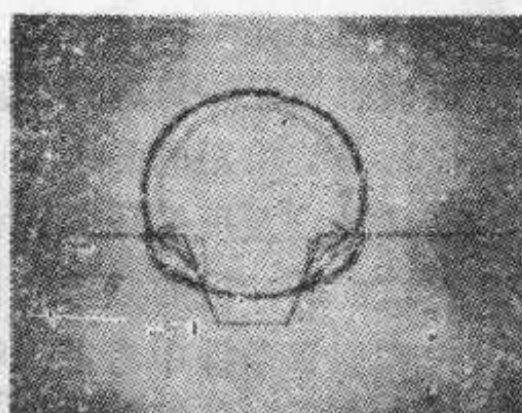
A



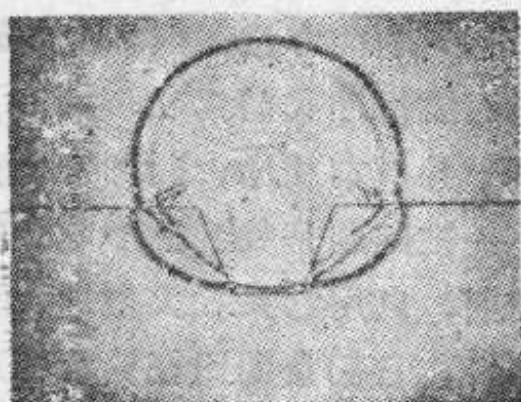
B



C



D



E



F

图 1-3 用数值方法推导而得的弹性波前的垂直剖面图
外圆代表纵波 (P 波) 能量的波前。内圆代表转换切变波 (S 波) 的
波前, 其传播速度大致为 P 波的 $2/3$ (根据 Kosloff 与 Keshef)

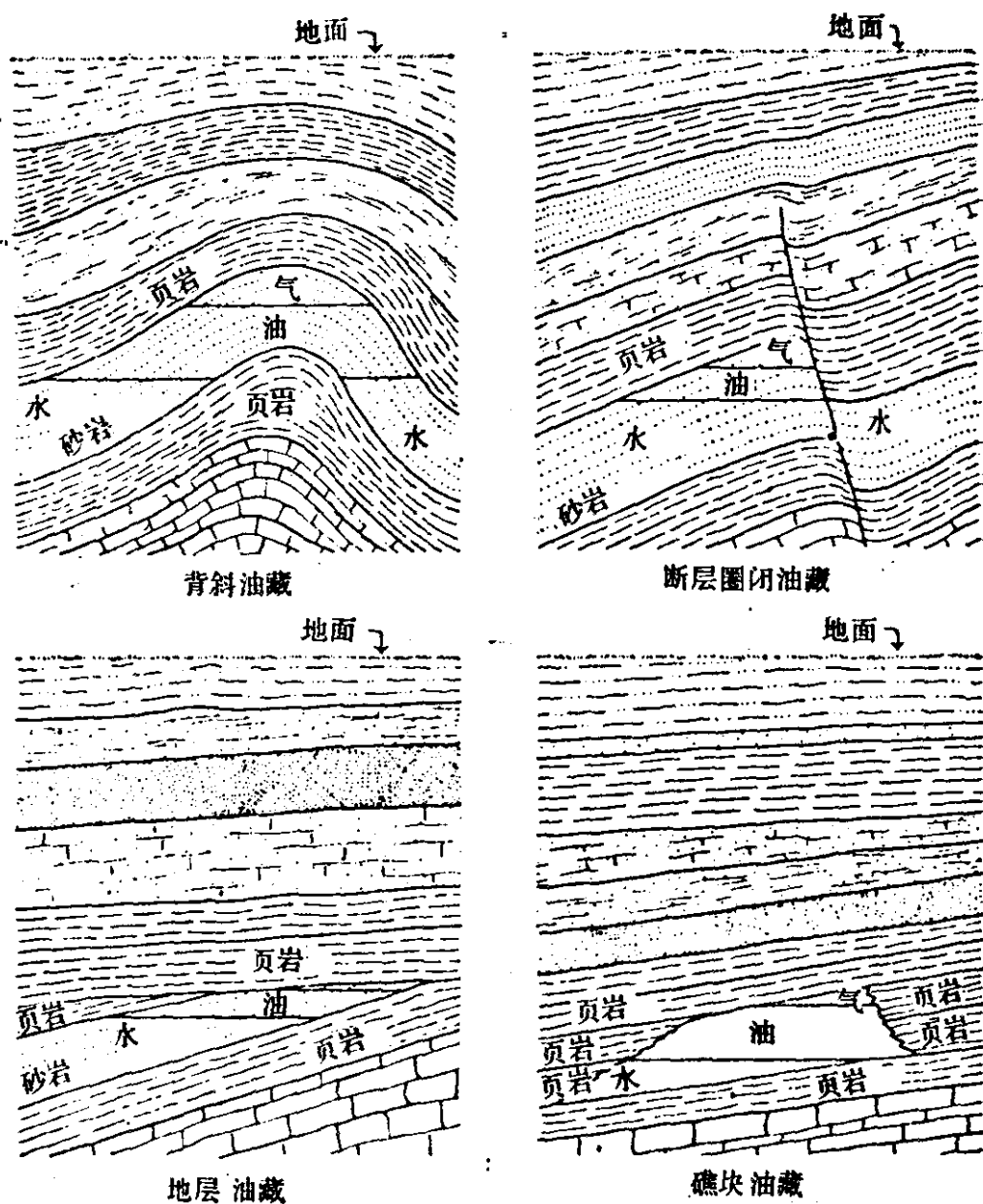


图 1-4 典型的烃类圈闭实例 (根据Dix)

人工合成地震道出发。勘探学家所有的直接地下资料仅仅是一个一维的一口井的钻井资料。其内容包括岩芯、岩屑及用不同下井仪器所得的测井曲线。测井仪器所测得的参数为声