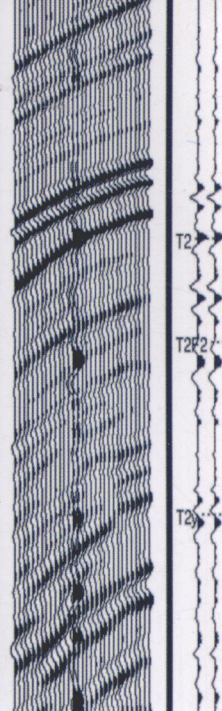


DIZHEN KANTAN JISHU
ZAI DAQING CHAOYANGGOU YOUTIAN
KAIFA ZHONG DE YINGYONG

地震勘探技术 在大庆朝阳沟油田 开发中的应用



徐运亭 万 江 邬在宇 储可利 著



石油工业出版社



地震勘探技术在大庆朝阳沟 油田开发中的应用

徐运亭 万 江 邬在宇 储可利 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在介绍地震勘探基本原理的基础上,以朝阳沟油田为例,分析了地震资料构造解释,地震储层预测,烃检测及相应技术的具体应用。

本书适合地震勘探技术及管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地震勘探技术在大庆朝阳沟油田开发中的应用/徐运亭等著.
北京:石油工业出版社,2009.12

ISBN 978-7-5021-7519-1

I. 地…

II. 徐…

III. 地震勘探-应用-油田开发-大庆市

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 214233 号

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](http://www.petropub.com.cn)

编辑部: (010) 64523562 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

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 8.75

字数: 222 千字 印数: 1—1000 册

定价: 49.00 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

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 地震技术及其发展简介	(1)
第二节 朝阳沟地区勘探开发概况	(3)
第二章 地震勘探基本原理与应用	(5)
第一节 岩石中地震波及其传播	(5)
第二节 地震数据采集基本技术与应用实例	(12)
第三节 地震数据处理基本技术与应用实例	(22)
第四节 地震资料的解释	(36)
第三章 地震资料构造解释技术与应用	(37)
第一节 地震资料构造解释的基本技术方法	(37)
第二节 二维地震构造解释技术	(43)
第三节 二维地震构造解释技术在三站气田的应用	(47)
第四节 三维地震构造解释技术	(55)
第五节 三维地震构造解释技术在临江油田双 30 井区的应用	(59)
第四章 地震储层预测技术与应用	(68)
第一节 地震储层定性分析技术与应用	(69)
第二节 地震储层定量分析技术与应用	(75)
第三节 地震储层反演技术与应用	(100)
第五章 烃检测的地震技术与应用	(128)
第一节 地震烃检测概述	(128)
第二节 反射波振幅随偏移距的变化 (AVO) 分析技术	(129)
第三节 基于地层特性的地震烃类检测	(132)

第一章 概 述

第一节 地震技术及其发展简介

地震勘探是地球物理勘探的一种方法。每一种物探方法都是以研究岩石的某一种物理性质为基础的，地震勘探就是依据岩石的弹性，采用人工的办法（用炸药或其他能源）激发弹性波，沿测线的不同位置用地震勘探仪器检测大地的振动；并把数据以数字形式记录在磁带上，通过计算机处理来提高信噪比，提取有意义的信息；用地质解释的形式显示其结果。

地震波的传播路径所遵循的规律与几何光学极其相似。波在传播过程中，当遇到弹性分界面时，将产生反射和折射；接收其中不同的波，就构成不同的地震勘探方法。目前主要应用反射波法地震技术，折射波法。透射波法只作辅助手段，转换波法经过十多年的研究，国外报道有成功的实例，但目前仍不能产生一定规模的商业效应，在中国还没有成功的实例。研究工作还在继续，不断进行新的实验。

本书所言地震技术主要讨论反射波法地震技术。反射波法就是在离震源较近的若干测点上，测定地震波及其旅行时——地震波从震源到不同弹性地层界面上反射之后回到地表面的时间。当地层倾角较小时，反射波的路径几乎垂直地表面，因而在测线的不同位置上法线反射时间的变化就反映了地下地层的构造形态。如果沿着地面上一条测线，一段一段进行观测，并对观测结果进行处理之后，就可以得到形象地反映地下岩层分界面埋深度起伏变化的资料——地震剖面图（见图1-1）。在图上可以看到地层界面1是水平的。因而在地面各点观测时，这个界面的反射波1的传播时间都相同。在这些反射波的振动图上振幅极大值的连线（地震勘探中称为一个波的同相轴）就是一条水平直线，形象地反映了界面1的形态。地层界面2是隆起的，所以来自界面2的反射波的传播时间在各点就不一样，在界面埋藏浅的地方，传播时间短，埋藏深的地方，传播时间长。这个反射波的同相轴就是弯曲的，与界面2的形态相对应。在工区内布置好多条测线，组成一个测线网，并在每条测线上都进行观测之后，就可以得到地下地层起伏的完整概念，再综合其他物探方法和地质、钻井等各方面的资料，进行去伪存真，去粗取精，由此及彼，由表及里的分析、研究，就能查明地下可能储油的构造，确定钻探的井位。当然，真正运用这个原理来查明地下地质构造，还需要克服很多困难。

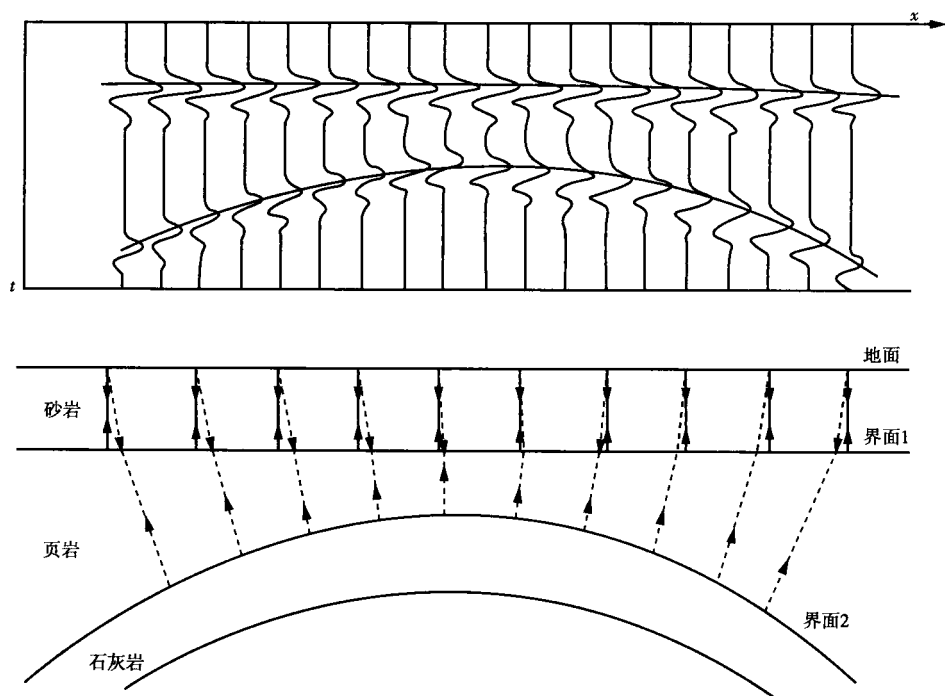


图 1-1 反射波勘探法原理示意图

虽然研究地震的历史很早，但直到 19 世纪，随着现代工业的发展，大量工程建筑的兴起，数学、力学、弹性力学得到了发展，随后关于地震波各种理论逐步形成和传播，并随数字和电子计算机技术的发展得到了迅速的发展。

反射地震勘探法实际上开始于 1913 年，当时费森登（Fessenden）应用声波测量水深和冰山，但由于在制造仪器方面的技术困难，反射波法直到 1927 年才得到工业应用。在第一次世界大战期间，德国人及其盟国都试验了用地震仪测定敌国的炮位，一战后，地震波在工业生产中得到广泛应用。反射波法的技术应用于折射波法，创造了折射波对比法，60 年来，地震勘探的发展大体可分为三个阶段，各阶段基本特点如下：

第一阶段：以光点记录、资料人工处理为特点。

第二阶段：以模拟磁带记录、多次覆盖观测、资料用模拟电子计算机处理为特点。

第三阶段：以数字磁带记录、高覆盖次数观测、数据用数字电子计算机处理为特点。

现在，地震勘探技术仍以数字化为主要标志迅速发展。采集系统向遥控遥测、高采样率（0.5ms、0.25ms）、多道（千道、万道）发展；野外工作方法技术方面则是发展高性能炸药震源、非炸药震源，用更高的覆盖次数观测，发展高分辨率地震勘探、三维地震反射波勘探，三分量采集、转换波勘探，检波器发展高频高灵敏度的数字检波器，以解决复杂构造、深层构造、地层岩性圈闭以及直接找油、气等地质问题；在数据处理方面，为了适应地震数据采集量猛增的需要，正大力提高计算机的处理能力和扩展专用设备（大容量高速计算机处理系统），新的处理软件，如叠前时间偏移、深度偏移、全三维处理软件和高速大容量（数千 GB）集群计算机得以应用。为了充分利用地震波的信息特别是气动力学信息，正在发展精确求解波动方程的理论和计算方法及处理技术（国外试验已基本成功），不断地引进其他基础学科和新兴技术的先进成就，人机联作的自动处理解释系统。

近十多年来地震解释技术得到了迅速的发展，目前地震解释工作基本告别了“刀耕火种”的时代，基于工作站平台的地震解释软件（如 LandMark，Geoframe）已成为基本解释工具，依据地震属性的特种解释性处理软件，如波形分类处理、相干处理、可视化处理、反演处理得到广泛应用，虚拟现实技术已成功开发，并在国外得到应用。未来的发展将是采取多种手段，实现采集、处理、解释的三位一体，相互渗透，钻探工作超前介入，随钻测井可实现中途调整，各种地震、地质理论将得到充分的应用，高度综合，准确、精细地发现并有效地击中地质目标，获取更多的油气资源。

第二节 朝阳沟地区勘探开发概况

朝阳沟油田位于黑龙江省肇州、肇源、肇东三县接壤部位。油田中心距大庆市约 150km，距哈尔滨市约 70km（图 1-2）。油田地势平坦，农田覆盖，防护林纵横展布，地面海拔 150~185m，油田气候属大陆性季风气候，年平均气温 3.6℃，年降水量 440mm，无霜期 140d。朝阳沟地区构造位置属于松辽盆地中央坳陷区朝阳沟阶地及长春岭背斜带，葡萄花油层含油范围主要分布于朝阳沟背斜构造，扶余油层的含油区则广泛分布，且在长春岭背斜带上油气并举。

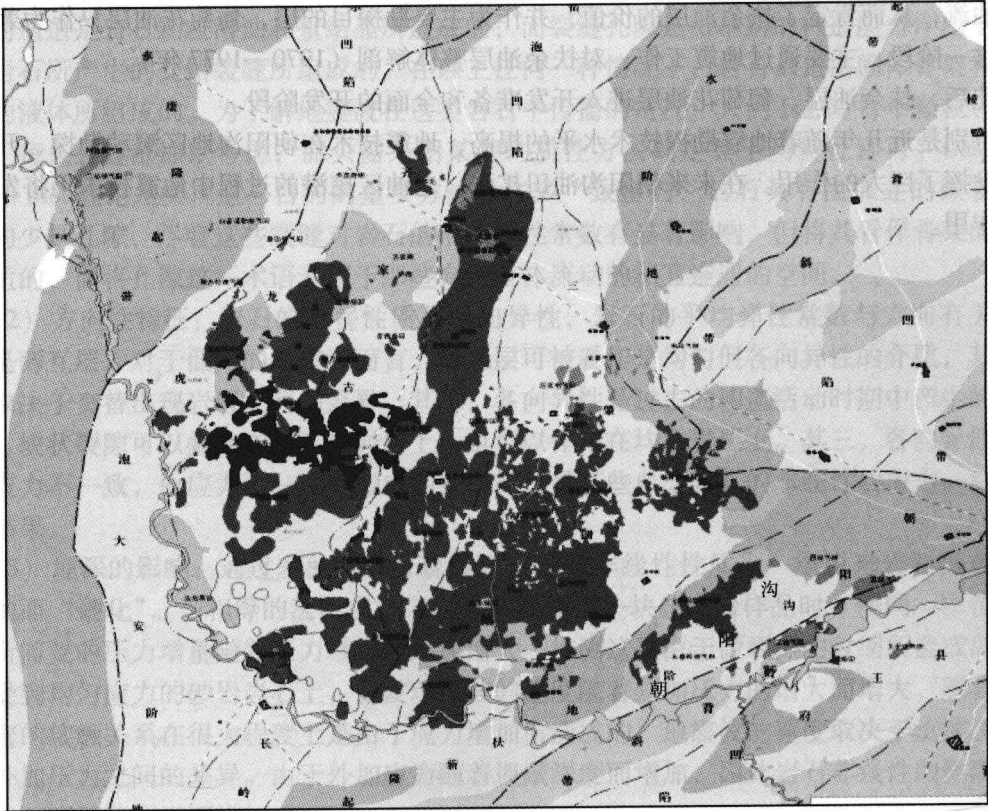


图 1-2 朝阳沟油田位置概图

在朝阳沟油田勘探、开发过程中地震技术得到了广泛的应用。该油区有不同年度、不同测网和多种覆盖次数的地震资料：1960 年完成测网 $(4 \sim 5) \text{ km} \times (10 \sim 12) \text{ km}$ 地震普查，1973 年在朝阳沟构造 188 km^2 范围内完成 $0.5 \text{ km} \times 1.0 \text{ km}$ 测网地震精查，1974 年完成整个朝阳沟地区 $2 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 地震详查，1987 年完成全油田 $0.5 \text{ km} \times 1.0 \text{ km}$ 测网地震精查，2002 年在临江地区（包括三站气田东—涝州气田及临江油田部分）实施了 30 次覆盖的三维地震 372 km^2 ，2003 年在肇源地区源 212—214 井区针对浅层，完成了小面元 $(15 \text{ m} \times 15 \text{ m})$ 的三维地震采集，满覆盖面积 46.6 km^2 ，2004 年兴城南—丰乐地区高覆盖次数（119 次）的三维地震勘探在朝阳沟油田区的面积约 100 km^2 。

从朝阳沟油田的勘探开发历程可看出地震技术功不可没。

首先，朝阳沟构造是 1960 年地震普查中发现的。1961 年钻第一口探井朝 1 井，在葡萄花油层井壁取心 8 颗，其中油砂 7 颗，扶余油层井壁取心 40 颗，其中油砂 26 颗。1963 年 11 月葡萄花油层与扶余油层合试，获得 $1.05 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业油流，从而发现了朝阳沟油田。期间共钻探井 3 口（朝 1、朝 2、长 1 井），仅在朝 1 井发现葡萄花油层，受当时地质认识的限制，认为葡萄花油层虽然埋藏浅，储油物性较好，但分布范围小而零散，开发价值小。而扶余油层属低孔、低渗、低产，无工业开采价值，暂停了油田勘探。这一阶段为油田发现阶段（1959—1963 年）。

第二阶段：从 20 世纪 70 年代起，对朝阳沟油田进行第二轮勘探，1973 年在朝阳沟构造进行地震精查，1974 年完成整个朝阳沟地区地震详查，经试油，扶余油层有 52 口探井获工业油流，从而肯定了扶余油层的价值，并作为主要勘探目的层，葡萄花油层只作为兼探层位。这一阶段，主要通过地震工作，对扶余油层整体解剖（1970—1977 年）。

此后，扶余油层、葡萄花油层进入开发准备和全面的开发阶段。

特别是近几年随着地震勘探技术水平的提高，地震技术在朝阳沟地区滚动勘探、开发过程中发挥了巨大的作用。在未来朝阳沟油田扩张、老油区挖潜的过程中地震技术仍将发挥巨大的作用。

第二章 地震勘探基本原理与应用

第一节 岩石中地震波及其传播

一、孔隙性岩石的基本性质

岩石具有均质性和各向异性的特点，其负荷（埋深）等对地震波传播均有较大影响。

(1) 均质性：一般岩石具一定孔隙，可以是粒间孔隙或粒内溶孔，其微小孔洞和相互连接的通道是岩石颗粒溶蚀和重结晶所造成的；而裂缝孔隙是由早期的构造应力作用于非渗透性岩石所产生的交错裂缝所组成的。在以上任何一种情况下，岩石都是由固体骨架和连为一体的液体所组成的。为了解地震波在这类岩石中传播的情况，人们不必对每个颗粒、每个孔洞、每条裂缝都加以考虑，而只需采用某种均质性方法确定其平均特征即可。Gassmann理论和 Biot 理论是实现这一目的的重要方法。许多“致密的”岩石具有由孤立的微裂隙所组成的少量孔隙，尽管这些裂缝对岩石的平均弹性常数有显著影响，但将其看作骨架的特征是合适的，而将孔隙这一术语专用于那些允许流体流动的相互连通的空间。

(2) 方向性特征：岩石的某些性质具各向异性，岩石的平均弹性常数与方向有关。其一，是薄互层，对于低频的地震波而言，单元层可被看作是均匀但各向异性的介质，其平均特征取决于交替出现岩层之间的差异。其二，各向异性是过去的构造活动时期中产生的块状裂缝，块状裂隙可以叠加在薄互层岩层上，也可以作用在均质岩层上。其三，各向异性是现代的应力不一致，由应力不一致所造成的各向异性是某些典型岩石的非线性的应力—应变特性的结果。

(3) 埋深的影响：通过多种方式可观察到岩石的非线性性质。一般说来岩石随着负载的增加而“硬化”。当相等的法向应力（压力）作用于—块花岗岩样品时，使同一单位体积缩小所需要的压力增量随着压力增大而迅速增大。推测这是由于微裂隙的收缩所造成的。在一个受到均匀应力的砂岩岩心上，曾发现纵波的速度随着外加压力的增大而增大，颗粒之间更紧密的接触关系在很大程度上是由于应力增加所造成的。地震波的速度取决于流体压力与总的外加压力之间的差异。由于外加应力随着埋藏深度而增加，因此岩石非线性的性质导致地震波速度随着深度而增加。

岩石不仅对机械应力的响应是非线性的，而且还具有非弹性的响应。这意味着地震波的能量被吸取，从而导致振幅随传播距离增大而衰减。由于单位距离上的损耗大致与频率成比

例，从而对于许多岩石而言，地震子波随着传播距离增加而变得越来越宽。

二、岩石中地震波

1. 弹性常数

如果固体各部位运动的三个分量在所有时间内都已知，则可以将弹性波完全地确定下来。在直角坐标系中，我们用 u_x 、 u_y 和 u_z 表示位移。当波传播时，一个典型的大小为 Δx 、 Δy 和 Δz 的体单元的形状会发生改变，通常称之为应变，如图 2-1 所示，在立方体的两个面之间的 x 分量的位移差是 $(\partial u_x / \partial x) \Delta x$ 。这种在长度上的局部变化定义为简单张应变。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}\end{aligned}\tag{2-1}$$

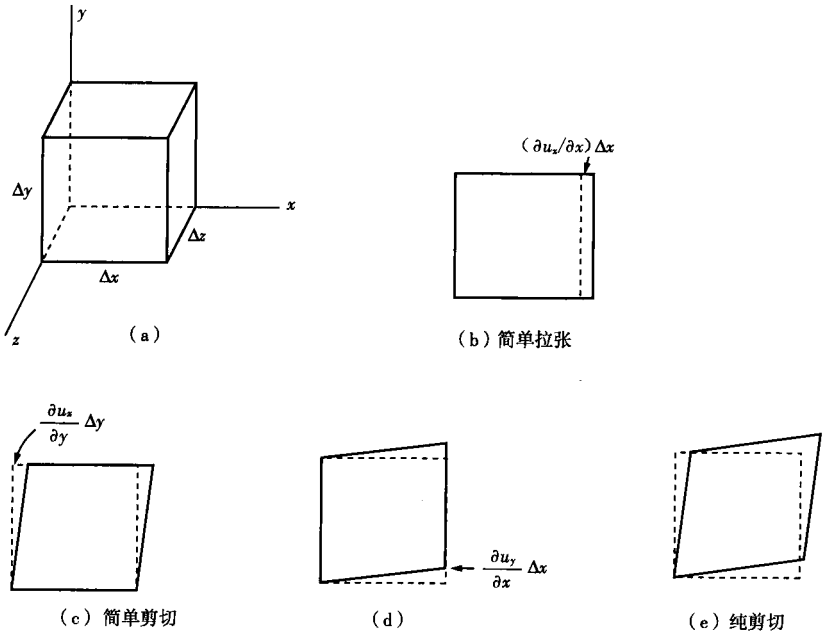


图 2-1 应变分量的定义图示

如果 x 方向上的位移在 y 方向上发生变化，则差值 $(\partial u_x / \partial y) \Delta y$ 将使起初的方形发生形变。如图 2-1 所示，差值 $(\partial u_y / \partial x) \Delta x$ 将以完全相同的方式使形状发生改变。因此，纯粹的剪切应变被定义为两个因素的和：

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}\end{aligned}\tag{2-2}$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}$$

单元立方体形状上的改变是由于相邻块体所施加的外力造成的。为描述这些外力，我们采用图 2-2 上的各种记号。在 x 面上的外力（单位面积上）具有 p_{xx} 、 p_{xy} 和 p_{xz} 3 个分量。正应力 p_{xx} 以向外为正方向（张力）。相切的应力 p_{yx} 是由于作用在单元体的 x 面上的外力的 y 分量所造成的。它不仅要求在相反的面上有相反的力相伴生，而且需要有 x 方向上的外力作用于 y 面上。从而，符号 p_{xy} （或 p_{yx} ）反映的是如图 2-2（c）所示的外力模式。符号 p_{yy} 、 p_{zz} 和 p_{yz} 具有相类似的含义。

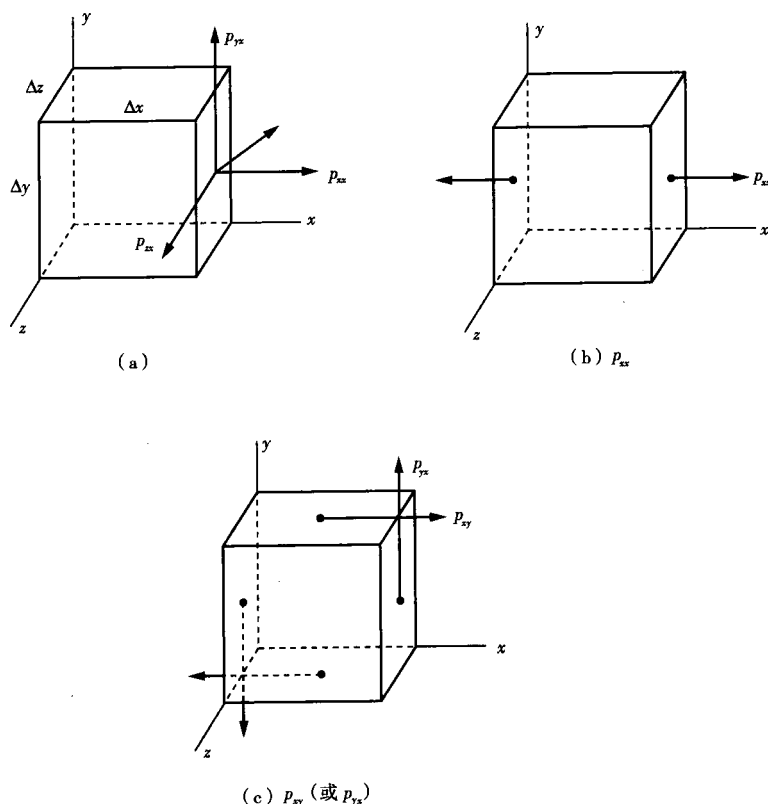


图 2-2 应力分量的定义图示

对于线形弹性体，其应变分量与应力成比例。为求取比例常数（弹性常数），设想一些可能的实验是有益处的。如图 2-3，在（a）中假定单元立方体在 x 方向被拉伸，从而 ε_{xx} 是唯一的应变。这是由平面压缩波所产生的应变模式，而我们称这一弹性常数为平面波模量 M 。对于同一应变，应力 p_{yy} 是由不同的弹性常数所建立的 [图 2-3（b）]。如果 3 个方向上的张应变相等，则相应的法向应力也相等 [图 2-3（c）]。这一状态我们可将其看作是压力（其符号与拉伸相反）： $-p = p_{xx} = p_{yy} = p_{zz}$ 。张应变和与体积的改变部分相等； $(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) = \Delta v/v$ ，由此导出比例常数即体积模量 k 。如果 ε_{yy} 和 ε_{zz} 很小，但足以使 p_{yy} 和 p_{zz} 等于 0，则 p_{xx} 与 ε_{xx} 之间的比例常数即是杨氏模量 E 。如果位移是由图 2-1 中的简单剪切或纯剪切应变所造成的，则其应力将是图 2-2（c）上所示的切应力分量，而其比例常数将是剪切模量

$$\mu : p_{xy} = \mu \varepsilon_{xy}$$

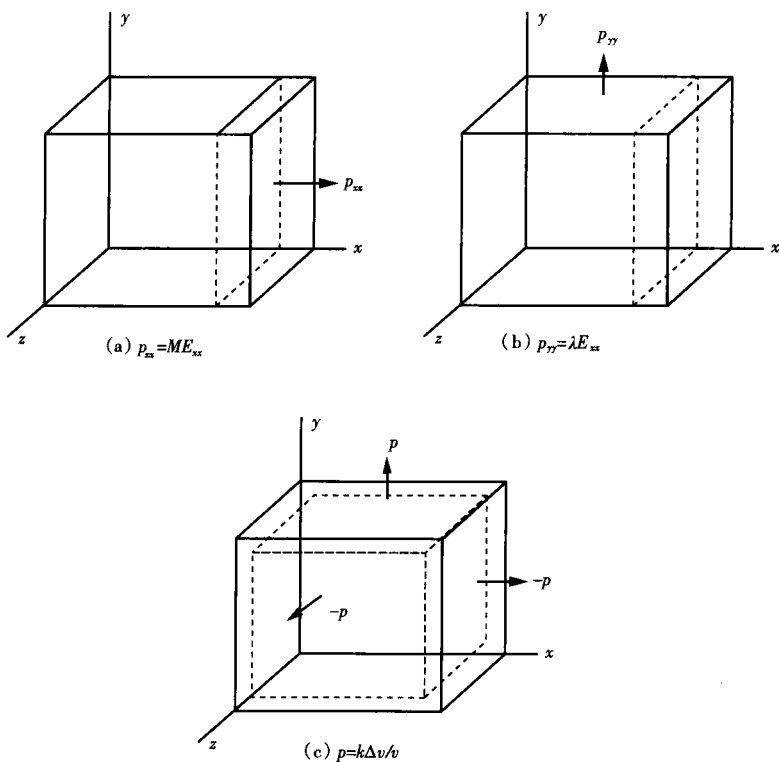


图 2-3 某些弹性常数的定义图示

一般描述均匀各向同性弹性介质只需有两个弹性常数（以及密度）即可，而五个弹性常数都是相关的，为了方便起见，在表 2-1 中给出了这些相互关系。

表 2-1 各向同性固体介质中各弹性常数间的相互关系

给定常数 求取常数	λ, μ	M, μ	E, μ	κ, μ	E, ν
拉梅常数 λ	λ	$M - 2\mu$	$\frac{\mu(E - 2\mu)}{3\mu - E}$	$\kappa - \frac{2}{3}\mu$	$\frac{\nu E}{(1 - \nu - 2\nu^2)}$
剪切模量 μ	μ	μ	μ	μ	$\frac{E}{2(1 + \nu)}$
平面波模量 M	$\lambda + 2\mu$	M	$\frac{\mu(4\mu - E)}{3(\mu - E)}$	$\kappa + \frac{4}{3}\mu$	$\frac{(1 - \nu)E}{(1 - \nu - 2\nu^2)}$
体积模量 κ	$\lambda + \frac{2}{3}\mu$	$M - \frac{4}{3}\mu$	$\frac{\mu E}{3(3\mu - E)}$	κ	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$
杨氏模量 E	$\frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)}$	$\frac{\mu(3M - 4\mu)}{M - \mu}$	E	$\frac{9\mu\kappa}{(\mu + 3\kappa)}$	E
泊松比 ν	$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$\frac{(M - 2\mu)}{2(M - \mu)}$	$\frac{(M - 2\mu)}{2\mu}$	$\frac{(3\kappa - 2\mu)}{2(3\kappa + \mu)}$	ν

2. 地震波传播的基本理论

(1) 地震波地学特点：地震波的振幅、频率、相位、偏振状态以及衰减程度等波的传播特点统称为地震波的动力学特点。

(2) 地震波运动学特点：波传播时间和空间之间的关系，即所谓地震波的运动学特点。

首先是惠更斯 (Huygens) 从几何学角度提出，以后夫列涅尔 (Fresnel) 又从物理学的角度补充而形成了波动传播的运动学基础，即惠更斯—夫列涅尔原理。

惠更斯于 1690 年首先提出任意时刻波前面上的每一个点都可以看作是一个新的点源，由它产生二次扰动，形成元波前，而以后新波前的位置可以认为是该时刻各元波前的包络。这就是说惠更斯主要研究了波前传播问题，根据这个原理可以从已知波前面的位置求出以后各时刻波前面的位置。惠更斯原理对于波传播的描述并非十分完善，因为它只给出了波传播的空间几何位置，而没有涉及波到达该位置的物理状态。

夫列涅尔补充了惠更斯的不足，他认为，由波前面各点所形成的新扰动（二次扰动）在观测点上相互干涉叠加，其叠加结果是我们在该点观测到的总扰动。这就使得惠更斯原理具有更明显的物理意义。

惠更斯—夫列涅尔原理从理论上描述了波的传播，但是没有解决如何具体计算某一观测点的波场问题。1883 年德国学者克希霍夫 (Kirchoff) 首先解答了这个问题。即：绕射积分理论——克希霍夫公式，惠更斯—夫列涅尔原理把任意时刻的波前面上的每一点看成一个新点源，由这个新点源反出的元波可以认为是一种广义的绕射子波，而下一个波前面上某一点观测到的总扰动也就是这些绕射子波的叠加总和。根据这个原理克希霍夫提出，如果在围绕着震源所在的某一闭合面 Q 上已知位移 $\phi(x, y, z, t)$ 及其导数，且这些值是连续的（没有奇点），那么可以算出 Q 面的以外任意一点 $M(x, y, z, t)$ 上由震源引起的位移 ϕ 的解。这意味着由震源产生的扰动已经传至 M 点，要求用它前一时刻 t_1 等时面上的位移 ϕ 及 ϕ' 值来表达 M 点的解 ϕ 。

波在一般情况下沿垂直于波前面的路径传播时间为最短。这个路径正好是波场的“力线”方向，即波的射线方向，波沿射线传播的旅行时间比沿任何其他路径传播的时间都小，这就是费马 (Fermat) 的最小时间原理，即著名的费马原理，它可以从泊松公式导出。

3. 平面波

不平衡的应力可使各单元体加速，可用方程式表示弹性波在固体中的传播。对某些最简单波的讨论可以为在各向异性 and 孔隙性岩石中更复杂波的讨论打下基础。首先要讨论的是平面压缩波。平面波的一个特征是在任一给定的时刻，在整个平面上所出现的情况完全相同。鉴于正弦波曲线与时间的依从关系，这将是一个相位恒定的面。在与等相位面正交的方向上传播的速度称为相速度。对压缩波而言，其速度为 $\alpha = (M/\rho)^{0.5}$ 。由于在各向同性固体中各个方向都是相同的，故我们就将传播方向定为 x 轴，而将 yz 面作为等相位面。其唯一的位移分量是：

$$u_x = Uf(t - x/\alpha) \quad (2-3)$$

这是一个以相速度 α 沿 x 轴传播的波。由于其质点运动完全与其传播的方向平行，因此它是一种纵波。由于其应变是简单拉伸而无剪切形变，因此它是一种压缩波。由于能量强度（单位面积上的能流大小）是应力与质点速度的乘积，因此能量传输的方向也是沿着 x 轴的。

在均匀各向同性固体中的第二类波是平面剪切波。同样也将 x 轴代表其传播方向，我们令 u_y 为其唯一的位移：

$$u_y = Uf(t - x/\beta) \tag{2-4}$$

这是一种相速度为 $\beta = (\mu/\rho)^{0.5}$ 的平面波。由于其质点运动与传播方向正交，因此它是一种横波。尽管应力与质点速度都作用在 y 方向上，但其乘积（传输能量）却在 x 方向上。

4. 散射与反射

固体中细小的非均质体所引起的平面波的散射可通过惠更斯原理定性加以理解。根据惠更斯原理，在任意一个时间零点之后的弹性波的连续传播，都可以通过把每一个体元看作是一个新的震源而计算出来。图 2-4 中所示为在一种简单情况下该原理的应用。在时间零点的波场由一个平面 P 波所组成，像一个薄的压缩层而向上传播。一个典型的体元所经受的应变可被设想为纯体积压缩 [图 2-4 (b)] 和纯剪切图 [2-4 (d)]。体元同时还具有质点速度，它与压缩作用成正比。作为弹性波的震源，体元表现出 3 种现象。首先，由于纯压缩作用，它将放射出一个球形对称的 P 波，如图 2-4 所示。所有这样的体元由这种单极放射的结果产生了两个平面波，一个向上，一个向下，它们的强度相同，且都是纯压缩作用。第二种现象是由运动质体的动量所引起的。当体元向相邻的固体运动时会使速度降低，因此它是作为放射状的一种点力。这种偶极的放射模式如图 2-4 所示，它随着 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ 而变化。所有体元作用之总和同样产生两个平面波。它们的大小与由纯压缩作用形成的波相同。然而其下行波是拉伸的，它与前一压缩波完全抵消了。在向上的方向上，这两种波叠加在一起而再次形成了一个初始压缩波层，并运动到一个新的位置上。由偶极震源所放射出的剪切波之和为 0。体元的纯剪切形变引起如图 2-4 (g) 所示的四极模式的剪切波，其在整个平面上之总和仍然是 0。因此，这些相当复杂的震源所起到的最终作用是传播平面 P 波。

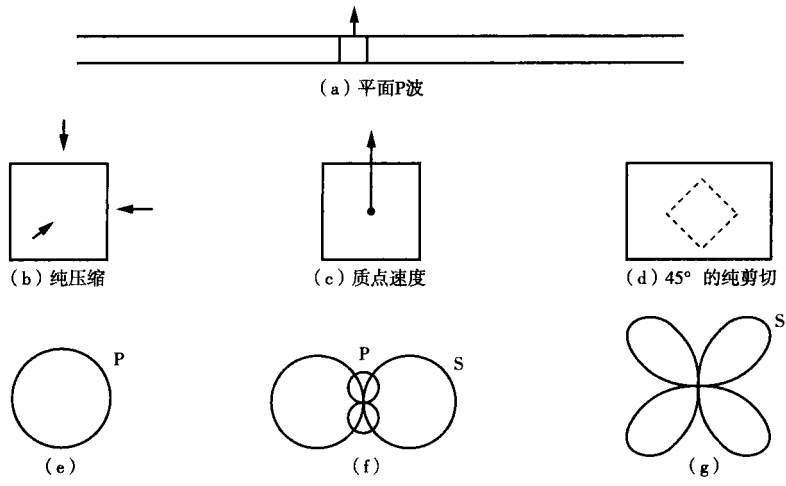


图 2-4 惠更斯原理应用于平面波

然而，假定以上所讨论的体元与周围的固体并不一致。如假定在体变模量为 k' 、剪切模量为 μ' 、密度为 ρ' 的弹性固体中有一个相应特征分别为 k 、 μ 和 ρ 的体元，则通过对由具中等反差的小物体所引起的散射的数学分析可得出如下结论：单极放射与 $(k-k')$ 成比例；偶极放射与 $(\rho-\rho')$ 成比例；而四极放射则与 $(\mu-\mu')$ 成比例。总的波场由向前传播

的平面 P 波和呈球面扩散的散射 P 波和 S 波所组成。入射的 S 波将不引起单极散射，然而偶极放射和四极放射将分别与密度差和剪切刚度成比例。

平面波在平面界面上的反射也可用惠更斯原理来分析，但如果用应力和位移的连续性原理来分析则无疑更为简单。设 $x-y$ 平面为介质 1 ($\rho_1, \alpha_1, \beta_1$) 和介质 2 ($\rho_2, \alpha_2, \beta_2$) 之间的界面，如图 2-5 所示。并假定这两种介质为紧密接触，因此，位移的 3 个分量必须是连续地通过这一界面。同样，作用到这一界面上的应力的 3 个分量 (p_x, p_y, p_z) 也是连续的。标志为 P_i 的箭头代表入射平面压缩波波前的法向。当这一波前与界面相交时，必须有如图所示的反射平面波和透射平面波出现才能使连续性条件得到满足。上述各种波沿着界面都必须具有相同的视速度，可称之为 c 。我们将用图 2-6 来表明这一速度是如何由 α_1 和入射角 γ_{P1} 所决定的相速度， α_1 是由 $\Delta d/\Delta t$ 给出的，而视速度 c 则是由 $\Delta x/\Delta t$ 给出的。

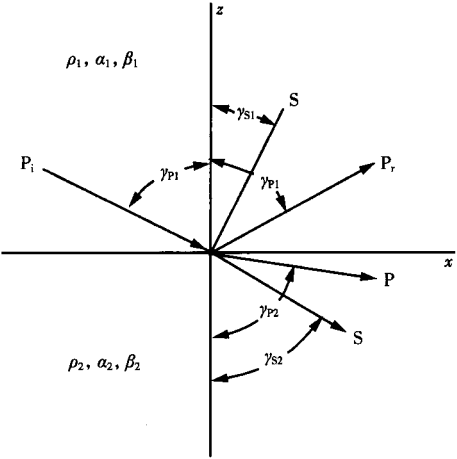


图 2-5 平面 P 波在平界面上的反射

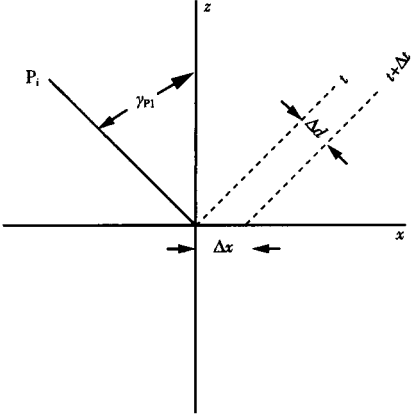


图 2-6 沿界面的视速度

由于 $\Delta d/\Delta x = \sin \gamma_{P1}$ ，所以有：

$$c = \alpha_1 / \sin \gamma_{P1} \tag{2-5}$$

对于其他的波，该图所表明的是斯奈尔定律：

$$c = \frac{\alpha_1}{\sin \gamma_{P1}} = \frac{\beta_1}{\sin \gamma_{S1}} = \frac{\alpha_2}{\sin \gamma_{P2}} = \frac{\beta_2}{\sin \gamma_{S2}} \tag{2-6}$$

总之，一个入射的 P 波派生出一个反射 P 波和一个转换 S 波，以及透射 P 波和透射 S 波。所有这些波都与入射波有相同的时间关系。如果入射波在其传播方向上的质点速度是 $U_0 f(t)$ ，则反射 P 波在其传播方向上的质点速度为 $U_0 R f(t)$ ，其中：

$$R = \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} \tag{2-7}$$

对于垂直入射 ($\gamma_{P1}=0$) 的压缩波， Z_A 可用 ρ_1, α_1 代换， Z_B 则可用 ρ_2, α_2 代换。在一般情况下， Z_A 和 Z_B 分别由它们所对应的介质特征所决定。反射系数可用 4 个无量纲的比值来表示，即 $\beta_1/\alpha_1, \beta_2/\alpha_2, \rho_1/\rho_2, \alpha_1/\alpha_2$ 。根据表 2-1 可知，对于一个给定的各向同性固体，比值 a 确定了其泊松比 ν 的大小。假设第一层介质中各个特征的值已给定，则反射系数随

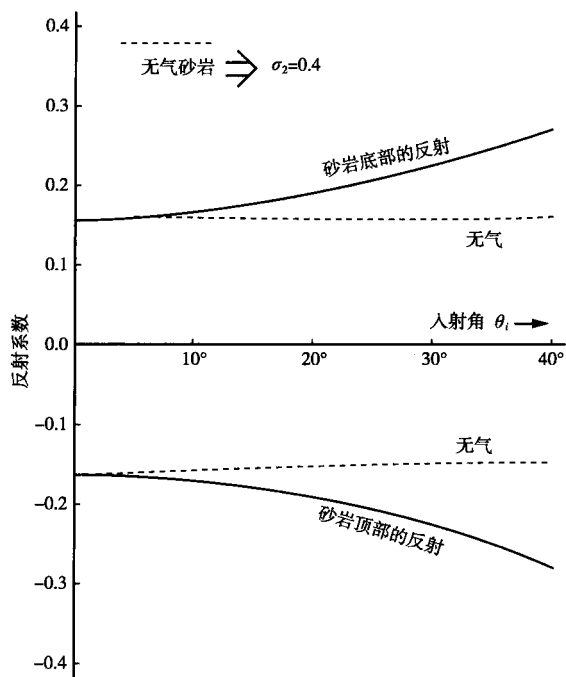


图 2-7 P 波反射系数与泊松比的关系
(据 Ostrander, 1984)

着入射角的变化将指示出反射层的泊松比的大小。由于气饱和和孔隙性岩石的泊松比与水饱和时有很大不同，因此泊松比的指示是非常有用的。在泥岩之间的孔隙性砂岩的反射说明了这一现象 (Ostrander, 1984)。当气饱和时，砂岩的泊松比为 0.1，而当不含气时，为 0.4。泥岩的泊松比是 0.4。在图 2-7 上表示出对应于两种不同的饱和度时反射系数相对于入射角而变化的情况。

5. 多次反射波

当地震波在地下传播时，遇到波阻抗不连续面就分裂成反射波和透射波，每一次反射波或透射波遇到另一个波阻抗不连续面就分裂成新的反射波和透射波，如此下去，一直无穷。尽管有一次反射波就有一次多次波，但是，多次波的振幅总比一次反射波的振幅小得多。深水中，长周期的水底多次波常常是严重的干扰，陆上浅层强反射面也会产生严重的多次波干扰。

第二节 地震数据采集基本技术与应用实例

一、地震数据采集的基本工作方法

反射波法地震数据采集就是在一定的观测系统（地震波的激发点与接收点的相互位置关系），通过人工震源激发地震波，由地震信号接收系统（包括检波器、地震数据采集仪器）记录来自地下的由震源引起的反射波。

围绕地震波的激发和接收两方面涉及一系列的技术工作：设计观测系统，通过试验确定基本技术参数，之后全面转入野外采集工作。

1. 试验

工作的目的是选取本工区内最合适的野外方法和技术。具体的试验内容根据所负担的地质任务、工区的地质构造特点、干扰波情况、地震地质条件以及以往的勘探程度来拟定。试验的项目通常有：

- (1) 干扰波调查，包括工区内干扰波类型、特征。
- (2) 地震地质条件的了解，如：低速带的特点，潜水面的位置，地震界面的存在与否，地震界面的质量如何（是否存在地震标准层），速度剖面的特点等。
- (3) 选择激发地震波的最佳条件，如激发岩性、激发药量、激发方式等。
- (4) 选择接收和记录地震波的最佳条件，包括最合适的观察系统、组合形式和仪器因

素的选择等。

试验工作一般放在生产之前，作为一个阶段进行，但为了提高全区采集质量，针对不同的表层条件，生产中往往有多次针对激发条件的试验。试验中不能同时改变一个以上的试验条件，试验因素要单一，否则将无法判断记录面貌变化的原因。在试验开始前要有明确的目的、方案。在试验工作进行中，必须及时分析、整理每次试验所获资料，总结经验，指导下一次试验进行。

2. 地震生产（即全面采集地震数据）

当试验完成，取得本工区地震标准剖面后，可转入正式生产。生产前应对地震仪器作详细检查，取得各种检查合格记录，表示仪器工作正常，才能正式开始生产，生产的基本内容和步骤如下：

（1）地震测量：把设计中规定的测线实际布置到工作地区，在地面上定出各激发点和接收排列上各检波点的位置，在每一排列的炮点位置埋上木桩，木桩上写明测线号及桩号，在检波点位置作上标记，以便下一步工作的进行。最后需绘制出测量成果图，计算、整理测量成果。

（2）波的激发使用炸药震源井中激发时，要在规定的位置钻炮井，把按规定炸药量装好的药包下至井中指定深度，引爆激发。爆炸组在做好激发工作的同时，必须严格做好安全工作。

目前我国陆上地震勘探，多用高密度、高爆速炸药作为震源，但也有使用连续震源或其他激发方式。为提高反射有效波能量和信噪比，往往采用组合（井）震源激发，如可控震源车、聚能弹震源等。

（3）地震波的接收：使用地震检波器、电缆线、野外地震仪等接收地震信号。要按测线上的桩号，摆好排列，在检波点上埋好检波器。排列摆好后，检查线路通畅与否，然后通知爆炸组放炮。在获得合格记录后，每放完一炮，可转移到下一排列继续工作。每天所获得的地震记录，经整理后交计算站或解释中心进行室内的资料处理及解释工作。

目前每个地震道信号往往是若干个检波器所接收到的振动叠加的结果，地震检波器组合是压制干扰的有效手段。地震检波器目前已由单分量（重向）发展到多分量（ x 、 y 、 z 三分量），由低频到高频（ ϕ 振频率），在地震技术发达的国家数字检波器以其更多的优势相对于模拟检波器，已开始使用，地震仪器也从几十道、几百道至千道，乃至向万道方向发展。

目前地震采集技术，主要体现在激发和接收两大环节上。为了监控采集质量，在采集过程中还配备了现场处理系统；为了精确的（静校正等）资料处理，在野外，还得完成系列表层调查工作（微测井、小折射等），并提供低、降速带等基础成果资料。下面是 2002 年临江地区三维地震资料采集实例。

二、 临江地区三维地震资料采集

1. 临江三维工区概况

临江三维高分辨率地震勘探工区位于黑龙江省的双城、肇东市境内，横跨松花江，交通极为不便，南起临江乡的辛家窝棚，北至库塘木泡子，西起西八里乡的江顶屯，东至永胜乡的黄家窝棚。该区块构造位置属松辽盆地东南隆起区，跨长春岭背斜带和宾县王府凹陷两个二级构造单元，西北接中央坳陷区朝阳沟阶地。本工区共有钻井 48 口，有一定的石油、天然气储量，与西北面朝阳沟油田相距较近。