

美国勘探地球物理学家学会 第65届年会论文集

中国石油天然气总公司科技情报所
地球物理勘探局 译
地质矿产部石油物探研究所情报室



石油工业出版社

美国勘探地球物理学家学会 第 65 届年会论文集

中国石油天然气总公司
地球物理勘探局
地质矿产部石油物探研究所情报室
科技情报所
译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是美国勘探地球物理学家学会第65届年会上所发表的部分论文的详细摘要。内容包括：井下地球物理、计算技术、开发和采油地球物理、解释方法及史例、地震采集、岩石地球物理、地震反演、地震岩性、地震模拟和偏移、地震处理等方面的最新成果。本书可供应用地球物理学科的专业技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

美国勘探地球物理学家学会第65届年会论文集/
中国石油天然气总公司地球物理勘探局科技情报所,
地质矿产部石油物探研究所情报室译.
北京:石油工业出版社,1996.9
ISBN 7-5021-1838-1

I. 美…

II. ①中… ②地…

III. 地球物理勘探—学术会议—文集

IV. P631-53

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第16104号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里三区一号楼)
煤炭工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 23 $\frac{1}{4}$ 印张 600千字 印1-1500
1996年9月北京第1版 1996年9月北京第1次印刷
ISBN 7-5021-1838-1/TE·1552
定价:40.00元

前 言

美国勘探地球物理学家学会(SEG)年会堪称世界勘探地球物理学界一年一度的重大学术交流会。1995年度的年会于10月8日~23日在美国休斯敦召开。年会上发表的论文系统地反映了世界勘探地球物理学各个领域的新成果、新方法、新技术和新经验,以及勘探地球物理学发展的新趋势,对世界勘探地球物理技术的新进展起着有目共睹的推动和促进作用,因此,备受我国勘探地球物理学界的关注。由石油工业出版社、中国石油天然气总公司地球物理勘探局科技情报所和中国地质矿产部石油物探研究所情报室联合翻译出版的“美国勘探地球物理学家学会年会论文集”能够每年定期地发行,与国内勘探地球物理学界的普遍关注及广大读者的热情支持和鼓励是分不开的。为此,我们谨表示由衷的感谢。

《美国勘探地球物理学家学会第65届年会论文集》精选了有关地震数据采集、处理和解释以及井下地球物理、采油地球物理、计算技术和研究史例等百余篇论文。前半部分由中国石油天然气总公司地球物理勘探局科技情报所组织翻译,经牛毓荃、金福锦和孙忠勤审校。后半部分由中国地质矿产部石油物探研究所情报室组织翻译,经李小秋、高林、程前进、游有志审校。

译 者

1996年6月12日

目 录

井下地球物理	(1)
新一代多道、内含数字信号处理器的井下地震数据采集系统	(1)
美国西得克萨斯 Permian 盆地的井间地震成象	(6)
研究史例	(11)
利用三维相干性进行地层和构造解释	(11)
三维地震相干性模型在特立尼达东部近海地层预测中的成功应用	(14)
东 Senlac 重油藏的地层和岩性综合解释	(16)
根据地震特征估计砂岩/页岩比和砂质储集层特性;一种综合研究	(21)
Swan Hills 1 单元;利用地震资料进行储集层描述可以提高产量	(24)
SEG1995 年春季专题讲座:下一次浪潮	(27)
SEG1994 年秋季专题讲座:地震子波、连井和地层圈闭研究	(28)
三个菲涅耳带实例	(29)
两种 3D 测量比较	(33)
计算技术	(36)
地震组构分类:一种地层分析的计算机辅助方法	(36)
工作站上 2.5 维真振幅偏移	(38)
三维内插和模型模拟物探和地质分散数据的一种方法	(42)
3D 叠前基尔霍夫偏移的并行实现及其对野外数据的应用	(46)
3D 叠前深度偏移在分布式存储系统上的实现	(50)
三维相移内插偏移(PSPI)的数据平行实现	(55)
在 Cray T3D 型机上进行高精度三维偏移	(59)
开发和采油地球物理	(62)
Ketcgyn 山油田:应用连续性图改进储集层特征描述	(62)
地震分辨率对地质统计综合技术的作用	(67)
加拿大艾伯塔 Joffre 油田的 3D-3C 地震特征	(71)
电磁技术	(76)
瞬变电磁法用于气储监测	(76)
解释方法及史例	(79)
三维三分量地震数据的解释方法	(79)
一个自然裂隙气藏的地震特征	(82)
横波分裂技术适用于煤层甲烷气勘探	(86)
用于油藏监测的地震特征:应用正演模型模拟的可行性研究	(91)
根据地震特征对孔隙度进行定性预测	(95)
应用 3D 地震资料和属性分析检测古地貌和可能的油气圈闭	(98)
一种通过 3D 叠后反演和岩石物理分析进行储集层描述的确定性方法	(100)
地震解释中的参照法	(103)
横波分裂是地震各向异性的指示吗?	(106)

方位各向异性介质中的反射时差·····	(110)
在巴黎盆地利用多分量反射资料和 VSP 描述裂缝性储集层 ·····	(114)
参展论文 ·····	(120)
井间地震中管波的分析与压制·····	(120)
得克萨斯西部井间资料的处理与偏移·····	(125)
单井盐翼地震成象·····	(128)
由压缩波测井曲线作地震 P 波衰减的波形反演 ·····	(132)
多次勘探中同时代资料的匹配与不闭合·····	(135)
对冲逆断层和正断层之间的关系;反射地震成象和有限元分析的结果 ·····	(136)
3D 和 2D 地震数据在阿根廷最大油田的勘探和开发中的作用 ·····	(139)
综合储集层特征描述流程的项目管理方法·····	(142)
Erchungchui 组隐蔽地层圈闭的地震特征;用于未来远景区油气资源评价 ·····	(145)
渗漏流体垫层 F(包括盐下)幼期油藏特征的地震检测 ·····	(148)
复杂三维构造的高斯束地震模拟及处理·····	(149)
利用物理模型研究盐下成象·····	(152)
加拿大南艾伯塔落基山山麓 Turner Valley 地区三维地下模型的二维模拟 ·····	(157)
用地震属性 AVO 分析、AVO 反演以及地震反演评估 Parigi 储集层特性 ·····	(160)
用 P 波 AVO 进行裂隙探测 ·····	(162)
三维 AVO 方法,有效性和可靠性 ·····	(165)
3D 非线性渐近反演:在实际和合成数据上的应用·····	(167)
湿润和干旱的湖相油页岩,格林河组的岩心、测井和地震数据的综合地层研究:	
怀俄明 Washakie 盆地 ·····	(173)
综合高分辨率地震数据的岩心数据描述陆棚边缘三角洲复合体的层序地层学·····	(174)
玻利维亚南部泥盆系 Chaco 盆地中深部天然气的勘探:	
层序地层学、预测和钻井结果 ·····	(177)
计算机工作站在环境地质研究中的应用:地球物理和地质数据的综合研究 ·····	(182)
静校正值空间分布的层析成象·····	(185)
近地表静校和地下构造的同时估计·····	(189)
用 SMART 方法确定速度模型 第一部分 理论·····	(193)
用 Delft 物理模拟装置进行三维数据采集研究 ·····	(198)
三维勘探设计的地震处理问题·····	(201)
丛林山区单道和多道遥测系统的试验比较·····	(204)
地震采集 ·····	(207)
稀疏采样排列波场的去假频处理·····	(207)
用 DMO 模型进行 3D 设计 ·····	(209)
为地震层序属性成图压制采集足迹·····	(211)
物理模型实验中沿走向与倾向观测的三维地震时间剖面的比较·····	(215)
岩石地球物理 ·····	(219)
量化通用烃类标记中不确定性的岩石物理学策略·····	(219)
多相储集层流体分布的地震特征:在储集层监测中的应用 ·····	(225)

地震反演	(230)
由地震反演估算薄层状储集层的孔隙度.....	(230)
三维精确时间偏移速度反演的可行性.....	(233)
用最可行近似法反演地震和测井数据.....	(238)
层析网格的层析成象.....	(242)
小波变换约束层析成象.....	(246)
广角反射剖面(WARP)资料解释;用非线性地震层析成象方法计算 2D 速度模型 ...	(250)
地震岩性	(253)
裂缝油藏 AVO 响应的方位变化	(253)
与方位有关的 AVO 分析,加拿大阿尔伯塔 Joffre 油田的例子.....	(257)
通过 AVO 反演进行岩性识别	(261)
薄层弹性 P 波 AVO 校正	(265)
地震模拟和偏移	(269)
一种用于偏移速度分析的全局技术.....	(269)
世界最大的 3D 叠前深度偏移项目的盐下成象	(273)
Mahogany 油田勘探中的 3D 深度偏移;勘探史例	(276)
再访 Marchand 海湾;利用最新技术开发油田	(279)
用于复杂介质地震叠前深度偏移的一种综合方法.....	(281)
共角度道集数据的三维叠前深度偏移.....	(284)
剩余时差的数学分析与速度分析.....	(289)
横向各向同性介质中的叠前偏移误差.....	(292)
三维射线追踪中已三角形化层面的递归细分.....	(296)
在三角形化层面和参数表示法之间建立联系.....	(298)
叠前粘滞声波伪谱模拟的并行计算.....	(302)
各向异性饱和孔隙介质中波场模拟.....	(308)
三维随机非均匀性对地震波运动学特征的影响.....	(312)
包裹体的地震散射.....	(316)
地震处理	(321)
3D 叠前 $f - x$ 相干噪音抑制	(321)
过渡带勘探:缺失重叠区时的相位均一化	(325)
用平面波合成成象法估计层析速度.....	(328)
反偏移到零偏移距处理.....	(333)
任意 3D 采集几何形式下的 DMO 校正	(336)
保持振幅的方位角校正.....	(341)
目标多次波的三维提取方法.....	(346)
专题研究	(349)
地球物理技术的发展趋势.....	(349)
用三道地震反射测量数据压制相干噪声.....	(351)
我们有除去海洋噪声的手段吗?	(356)
联合运用层序地层学和三维地震成象法研究低容纳型盆地.....	(360)

井下地球物理

新一代多道、内含数字信号处理器的 井下地震数据采集系统

Xuguang Li, Western Atlas

摘要 内含数字信号处理器和 $\Delta-\Sigma$ 模/数转换器(ADCs)的新一代多道井下地震数据采集系统已经研制出来。已引入新的实时数据采集和处理方法并用 DSP(数字信号处理)芯片实现。来自 5 个深度的 3 分量多道信号以自激方式由 ADC 并行数字化。多道信号通过 DMA(直接存储器存取)传送而被采集,然后在井下以并行方式重建,以便满足从高采样率至各种低采样率的分样要求、使自激波形特征与震源子波同步的要求、提高信噪比滤除无用频率的要求和建立去假频滤波器软件的要求。这些功能靠原始信号与相应的原设计 FIR(有限脉冲响应)结构间的一次 FIR 运算同时完成。每道耦合的 DC(译注:直流)漂移分别通过自适应 DC 切除来滤除。这种新的算法使测井时间有效地减少,而井下地震测量(如 VSP)数据的采集质量提高。该算法也能容易地用于其他数据采集系统。迄今为止,这种系统已在全世界获得 100 次成功测量的结果。

引言

井下地震测量方法是在地表或井眼中产生地震信号,由固定在不同深度井壁上的检波器进行记录。结合这些所记录的井下地震波记录道,我们能独特有效的地震处理方法解释大地的地震构造。这些处理后运算的出发点在很大程度上取决于数据采集系统的优质地震原始数据。

第一代井下地震采集系统通常是纯单道模拟系统,它是由井下检波器接收特征波形。这些系统通过电缆传送这些模拟信号到井口。很显然,由于电缆和井孔特性,数据传送过程中的信号质量会严重恶化和畸变。此外,由于只是单道仪器,测井时间大为延长。第二代采集系统由于数字域信号替代模拟域信号而有所提高。信号在井下数字化且以数字格式拾取,然后通过电缆送到井口。数字域信号明显的优点是,一旦波形道由模拟转换成数字后,成为不产生畸变的格式。通常利用微型控制器来控制采集过程,但由于功率不足,普通的控制器不适合于执行甚至是改善信号质量的预处理工作。典型的转换器是一个浮点 ADC(模数转换器),只有当外部控制信号(例如到震源的激发信号)发送命令采集时,它才开始工作。因此,浮点 ADC 容易与震源的动作同步。浮点 ADC 的局限性是需要传感器之间插入模拟的假频滤波器,其在 $1/2$ 采样频率点处具有所谓“急剧截止”的特性。建立这样的特性困难重重且价格昂贵,并且通常引起 S/N (信噪比)降低。要获得多种采样通常也是困难的,因为需要不同的模拟假频滤波器。通过总结上述局限性,我们得出下面的结论:前一代井下地震数据采集系统的主要缺点是,没有解决实时井下处理信号能力的这些问题。

我们的第三代采集系统的要点是放入一个得克萨斯仪器公司的 TMS320C30 数字信号处

理器和采用晶体半导体 CS5336 Δ - Σ ADCS。DSP(数字信号处理器)芯片对一循环中的整数或在浮点数据上能完成并行乘法和 ALU(算术逻辑单位)运算。对于同时 I/O 和 CPU 运算,处理器也具有通用寄存器文件、程序高速缓冲存储器、专用的 ARAU(辅助寄存器算术单元)、内部双臂存取存储器和单片 DMA(直接存取)控制器(得克萨斯仪器公司,1991)。这些特点为实时采集和处理地震波形道打下了基础。 Δ - Σ ADC 本质上以非常高的速率始终对信号过采样(晶体半导体公司,1990)。因此,这就意味着它只需不精确的模拟假频滤波器或根本不要假频滤波器,这是个重要的优点。数字化后的信号已净化到几乎没有假频特征。但使用 Δ - Σ 转换器的主要麻烦是其自激型 ADC,意思是它不在外部命令信号的控制下开始采样。因此, Δ - Σ 转换器与外部时间基准同步是困难的,时间基准的例子可以是上述用来激发震源的激励信号。为了获得高精度数据,我们研制并实施了一个新的方法,这就是使用装有高性能但不同步的 Δ - Σ ADC 的 DSP(数字信号处理器)芯片。所有单道信号通过 DMA 传输而被采集。然后,在井下以并行方式重建以满足从 4kHz 到各种低采样率的分样的要求、自激信号与震源同步的要求、滤除不需要频率以改善 S/N 的要求和预防频率产生假频的要求。这些多个功能在原始信号和相应预定的 FIR 结构内靠一次 FIR(有限脉冲响应)运算就能完成。这一事实反映该方法的完美和有效。这就使得多种处理功能可能实时完成。所有道中耦合 DC 漂移由相应的自适应 DC 切除分别滤除。这种新的方法使得测井时间显著地减少、系统功能的灵活性极大地增加、井中地震测量的采集质量和数据精度都得以提高。

系统结构

典型的井下地震采集系统的结构如图 1 所示。地震波场是由位于地面或相邻井中的脉冲震源或频率扫描震源产生的,爆炸信号不只是用来激发震源,而且也发送到井下仪器使之与采集过程同步。子波通过大地介质传播到推靠在井壁上的多分量检波器。为了能产生有效图象,检波器安置在井中许多深度上,从每个深度来的检波器信号经放大后送到数据采集仪器。在由电缆遥测系统发送到地面以前,最多有 16 个信号利用 16 个并行的 Δ - Σ ADC 以 4kHz 数字化,通过 DMA(直接存储器存取)传送,由 DSP(数字信号处理器)芯片进行采集,并用新算法进行实时滤波、同步、DC 消除、分样和重建等处理。该系统能同时记录多达 5 个 3 分量检波器的数据,它们通常相距 25~75ft。主计算机接收来自遥测系统的这些波形道用于显示、储存和硬拷贝。

井下采集系统和处理方法

16 个模拟信号由 16 个 Δ - Σ 转换器以自激模式进行并行数字化,每个转换器的输出是 16 位数字,表示检波器以 4kHz 速率采样产生的信号的振幅。然后这种数字由 DMA 传送器连接 DSP 芯片。以常驻 DSP 芯片中的软件形式执行的算法完成采集和处理功能。井下数据采集和处理的流程图如图 2 所示。16 个数字化的信号供给 16 个 DC 消除选件。DC 成分分别滤除后,信号发送到具有 FIR 结构的 16 个处理单元以使同步、滤波和根据不同的重采样率要求进行分样。其输出成组地通过遥测系统送往井上。

DC 切除

所有信号都从检波器前置放大器的输出到 ADC 输入受到 DC 耦合,这就可能引起 DC 漂移的大小与弱的地震信号相当,甚至使信号淹没在大的 DC 成分中。为了解决这个问题,每道 DC 漂移通过平均某个周期的信号计算出来,并且在获得新值时加以修改,然后从记录中的每个样点减去这个值,这样就消除了 DC 漂移。由于所计算出的 DC 值总是不断修改,所以自适应 DC 值近似地代表当前记录的 DC 分量。这个 DC 切除不影响 DC 漂移外的任何频率成分,

因为它从每个样点简单地减去这个值。显而易见,这种 DC 消除比普通的高通滤波器更好,这是因为滤波器的过渡频段的存在会衰减低频成分。

值得一提的是,一旦采集的信号出现,就停止修改 DC 切除值直到这炮记录完成。这就保证对一炮记录只用一个 DC 漂移校正量,避免了该记录中“台阶式”变化的可能性。

FIR(有限脉冲响应)运算

FIR 结构对数字字进行有限脉冲响应滤波,更具体地讲,是对全部各道信号进行同步、滤波和分样。

送到 DSP 芯片的数字字代表模拟信号由自激模/数转换器分隔的时间上生成的数字采样值,意味着没有外部控制作为数字码开始生成的时间参考。为了能确定距震源激发瞬间经过的时间,必须以震源激发为基准来同步数字采样。经过的时间可以是相对于系统操作员输入的震源激发瞬间的任一值,这就意味着可在震源激发前或后的任一时刻开始获得采样。在 ADC 自激采样的基础上,使用 FIR 结构能生成数字采样值,它表示与系统计时器一个周期相对应的任一预定时间上的起始重采的信号值。这个计时器周而复始产生 $1\mu\text{s}$ 的计时脉冲,其同步精度为 $\pm 0.5\mu\text{s}$ 。值得指出的是:我们不能使用普通的插值技术(例如线性内插、三次采样内插),因为这些内插算子相当于设计不好的低通滤波器,这种滤波器会衰减有用频率成分,而且不能有效地防止在分样过程中产生假频。

需要把数字字由 4kHz 重采样到更低或相同的采样率,目前可以是 500Hz、1000Hz、2000Hz 和 4000Hz。如前所述,把数字字重采样至较低采样率,要求消除或滤除所需低频采样率的 1/2 频率以上的信号成分,以避免产生假频。如果我们想要将 4kHz 采样率的数字字分样为 1kHz 采样率,那么 1kHz 采样率的信号频率范围是 0~0.5kHz,所以,在我们进行分样前,0.5kHz~2kHz 间的频率必须滤除来防止假频。同样的处理适用于其他分样要求。对不同的采样率设计了 4 组 FIR 结构。滤波和重采同时

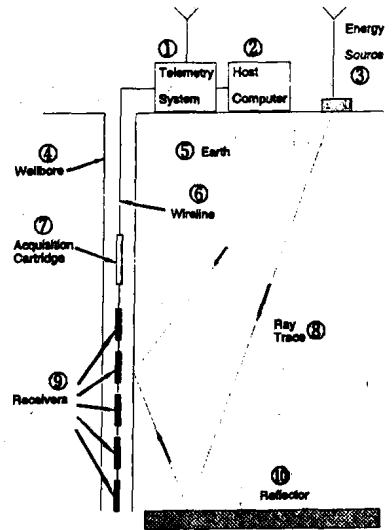


图 1 井下地震数据采集系统示意图
①遥测系统;②主计算机;③震源;④井眼;
⑤大地;⑥电缆;⑦采集仪器;⑧射线轨迹;
⑨检波器;⑩反射层

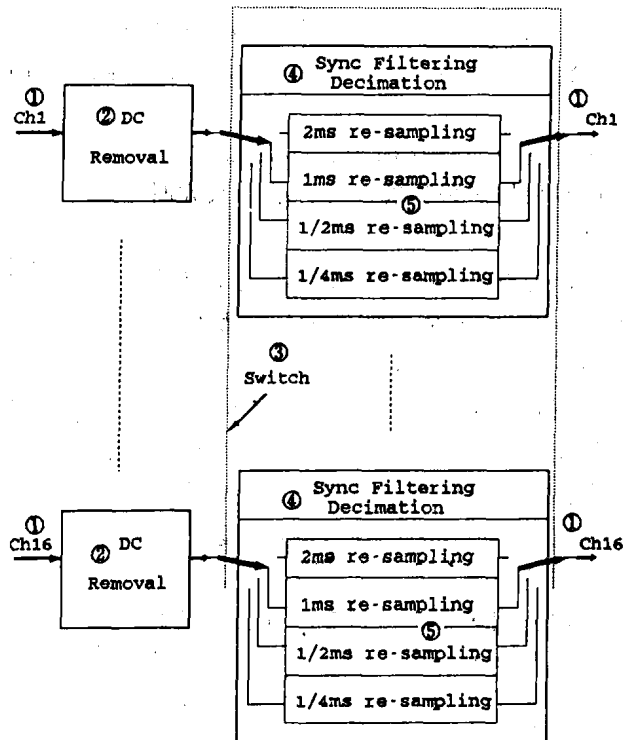


图 2 常驻 DSP 芯片的采集和处理软件功能图解
①道;②DC 切除;③电子开关;④同步滤波分样;⑤重采样

进行。对每种重采率可以选择不同的 FIR 结构。选择可由地面上的仪器操作员控制。

数学分析证明了 FIR 运算能完成同步、滤波和分样功能(Oppenheim 等,1975)。下面的方程式表明仅一次选择的 FIR 运算就能完成这些功能。给出原始数据 $x(n)$ 、采样频率 f 、需要的分样率 M 、具有 N 个分支的 FIR 系数 $h(n)$ 、不大于 $F/(2 * M)$ 的低截频率,整个过程的输出 $y(m)$ 能写成

$$y(m) = \sum_{k=1}^N h(k)x(Mm - k)$$

式中, M 和 m 是样点标示。因此,只需一次 FIR 运算就能完成全部功能。

借助图 3 和图 4 能更好地理解在 DSP 芯片中完成的 FIR 运算。图 3 为一检波器模拟信号用平滑曲线表示的图形。表示模拟信号采样值的数字字,它是 $\Delta-\Sigma$ 转换器以 4000Hz 的采样率产生的,其数值表示在该图上。通过对每个数字采样来的输入值都乘以时间重合的滤波器加权系数修改 FIR 结构,在中央响应峰值上产生一个输出值。第一个计算值位置与预定的时间基准同步,例如震源起爆时获得的信号。图 4 中相继的重采样输出值,即图上显示的数字字的值,能通过序列标志使滤波器响应点的

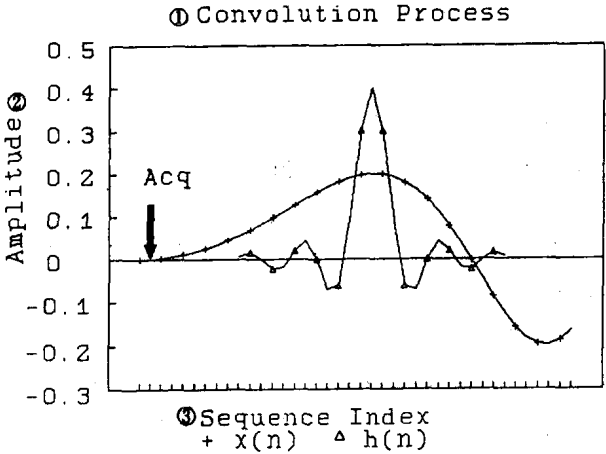


图 3 输入序列 $x(n)$ 与 FIR 系数 $h(n)$ 间的选择性褶积
ACQ 箭头表示获得信号发生的瞬间;①褶积过程;②振幅;③序列标志

时间位置递增计算出来,序列标志可以是按重采样出现的彼此分开的一系列时间段。

作为例子,图 5、图 6 给出重采样率为 1ms 的 FIR 结构特性曲线。整体观察图 5 中的响应,可以看出等波纹特征,以及截频带中深达 105dB 的衰减,极大地阻止了噪音。仔细观察图 6 中通带的响应,表现出 0.0001dB 这样小的等波纹现象,有效地将通带畸变减到最小。

结论

本文阐述了一种新型的井下地震数据采集和处理系统。通过创新的数字信号处理技术与高速 DSP 芯片和高性能的 $\Delta-\Sigma$ ADC 相结合,我们的系统表现出

获得高质量高精度信号的能力,具有灵活的系统功能。由于多深度检波器并行工作,系统能显著地减少上下钻具的时间。新型 FIR 结构的运行,为完成多个功能创造了条件,即只需一次选择性褶积就可完成同步、滤波、分样和重建。算法的高效率可以实现井下实时信号处理。高

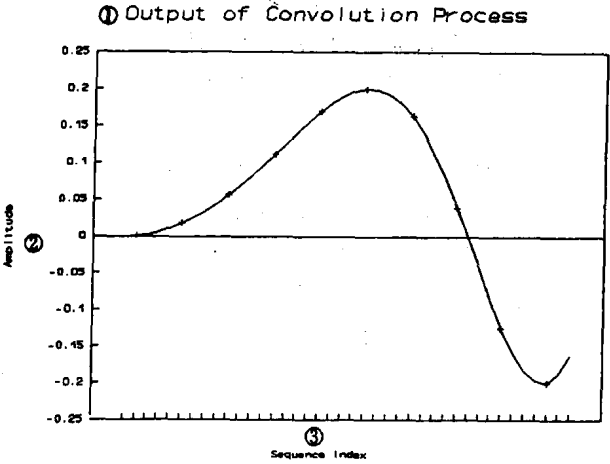


图 4 图 3 选择性褶积过程的输出序列 $y(m)$
①褶积过程的输出;②振幅;③序列标志

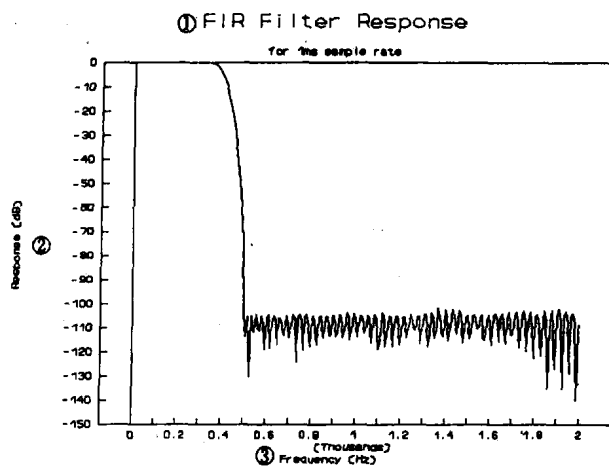


图 5 1ms 重采样 FIR 结构响应的全视图

①FIR 滤波器响应;②响应(dB);③频率(kHz)

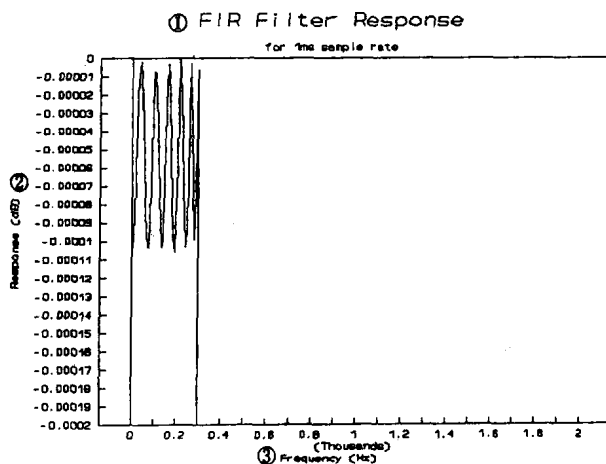


图 6 图 5FIR 结构响应通带的波纹细视图

①FIR 滤波器响应;②响应(dB);③频率(kHz)

性能的等波纹 FIR 滤波器通常在通频带中只有 0.0001dB 尺度的波纹,它使通过的信号具有最小的畸变。截频带的 105dB 规模的衰减极大地阻止了不希望的频率成分,这就产生极高的信噪比。

该系统具有非常灵活的重采样间隔选择,包括 2ms、1ms、0.5ms、0.25ms。不用耽心分样引起的假频信号,因为通过 DSP 软件实现了近乎完美的去假频滤波。与外部激发信号的同步误差限制在 $\pm 0.5\mu\text{s}$ 。系统提供真正的 96dB 的动态范围,且道间半音低于 -96dB。DC 漂移的切除是通过减去其在每个样点最后的测定值实现的。所有频率成分,除 DC 漂移外,用这种处理完全保持没有任何畸变。这种处理比常规的高通滤波器要好得多。结果是一种高性能的井下地震采集系统。至今,这种系统在全世界已获得 100 次的测量结果。

高章伟 译

美国西得克萨斯 Permian 盆地的井间地震成象

Robert T. Langan, Chevron Petroleum Technology & Stanford University;

Jerry M. Harris, Stanford University; S. K. Lazaratos, TomoSeis, Inc.;

Terry L. Jensen, Chevron USA; and Mark A. Van Schaack, Stanford University

摘要 近3年来,井间成象技术一直迅速发展,这是因为处理方法更加完善,数据采集费用一直在下降,施工的井间距离一直在增加。美国西得克萨斯 Permian 盆地成为发展这种技术的理想环境,因为碳酸盐岩为主岩性的地震衰减相对较低、大量老油田的合适井距和非常多的反射界面。现有技术允许我们在碳酸盐岩中以 2000ft(650m)左右的井距工作,并使反射层的 P 波和 S 波在 8~15ft(2.4~7.6m)范围成象。井间技术不局限于碳酸盐岩,尽管大多数最近的应用是在这种环境中。

在 Permian 盆地我们已涉及到 3 个独立的井间实验,各自都有特殊的任务。第一个实验涉及中央盆地台地东边的 Grayburg 组储集层中的注 CO₂ 工程项目。这里,我们正努力描述从地面 3D 地震数据得不到的小尺度储集层特征,并且直接使 CO₂ 前缘成象。第二实验涉及东面陆架上的中 Clearfork 组储集层中的水驱情况,这里我们试图说明相邻井对注水不稳定的响应。在第三个项目中,我们在努力使狼营组的 3D 地面地震图象中的隐蔽构造和地层异常成象。

引言

两项最近创新已对井间地震技术有重要的影响。第一个是“飞行放炮”的采集方法,这种方法中,井下震源在具连续向上运动中在预定的各深度段激发,而检波器固定在其位置上。这种采集技术的速度大于每天 20000 道,因而费用迅速地减少且油田作业中断时间最少。

第二个创新是实现实际数据真正井间反射的成象算法,可以从一井到另一井使反射层成象(Lazaratos 等,1995)。这个算法是非零井源距 VSP 成象方法的变种,不同的是井间数据组中信号道的数量比非零井源距 VSP 采集的大许多倍。

我们一直在西得克萨斯 Permian 盆地的老油田中进行各种应用,以便推动该技术的发展。Permian 盆地提供一个比较容易克服许多先前与数据采集和处理有关的问题。例如,尽管我们的震源功率比较小,这个区域能穿透的碳酸盐岩(高 Q 值)加上比较小的井距,仍能采集到高信噪比的数据。其次,这些碳酸盐岩的 P 波和 S 波速度比水的速度高,使它能将反射波场的分量从与管波有关的相干噪音中分离出来。最后一点,这些碳酸盐岩的剧烈变化的速度和密度结构产生含有很多反射的波场,有助于发展适合井间几何成象的算法。

Permian 盆地的地球物理条件并不是在此处发展该技术的唯一理由,在许多老油田仍然存在较大储量,需要不断提高技术才能把它们提取出来。利用井间地震技术获得的信息,可能更加有效地设计和利用这些技术。

本文中概括的三个史例仍是活跃的研究课题。我们已根据井间成象提供一些某种程度上是抽象的解释,目的是证明井间成象存在有非常高的分辨率。这种分辨率是可能的,因为数据是用相当高频(在大多数情况下,压电元件以 200~2000Hz 的频率扫描)的震源、间距很小的 5 深度检波器串采集的。

研究事例 1:CO₂ 气驱项目

中央盆地台地东边的 McElroy 油田(见图 1)CO₂ 气驱项目为我们提供了对储集层中存在

CO₂ 的隐蔽地震效应的成像和使用井间反射成像来帮助油藏描述的机会。我们已采集了两条剖面。一条的井间距为 185ft(56m), 另一条为 584ft(178m)。每条剖面包括 40 000 道左右。两条剖面的采集时间约为 5d。两条剖面都有 200 个左右的震源点, 每个震源点对应有 200 个检波点。窄剖面(185ft)中震源和检波点间距都是 2.5ft(0.8m), 宽剖面中我们将间距增加到 5ft(1.5m)。

图 2 为 CO₂ 气驱项目和这两剖面位置以及附近的井位。窄剖面(1068~1202)为我们提供了高质量的数据集, 用它来发展成象算法。

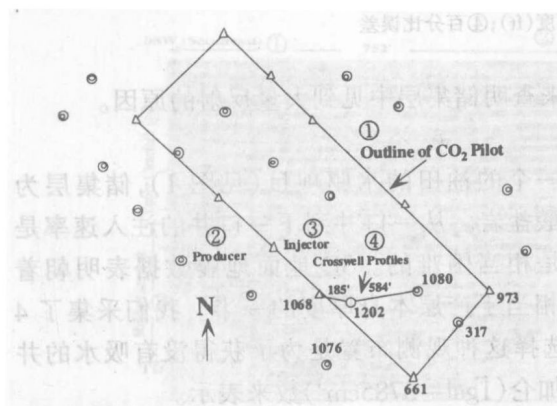


图 2 注 CO₂ 项目的井间剖面位置

①注 CO₂ 范围轮廓; ②生产井; ③注入井; ④井间剖面

间, 这两张图相减证明, 在已成象范围的中间, 其重复性优于 2%, 接近 1%。多数错误在边缘且与有限射线路径的覆盖范围有关。自从采集了这些数据以来, 已改进了仪器和采集方法, 我们相信这会进一步改善总的重复性。

1995 年 5 月, 我们采集 CO₂ 注入后的数据集, 根据岩石物性测量结果分析和 Nolen - Hoeksema 等人(1995)的理论模拟, 我们认为由于 CO₂、油、水的混合物的存在, P 波速度的平均变化可能在 2% 左右, 但局部的影响或许是大很多。

Laearatos 等人(1995)已研究出 Wyatt 的 VSPCDP 变换及其由井到井映射反射的变种。使用这个算法得到如图 4 所示的 P 波和 S 波的反射图象。储集层区含有许多反射层, 在 P 波图象中, 特征波长约为 12ft(3.7m), S 波图象中, 波长约为 8ft(2.4m)。

在储集层以下 3060ft 左右的深度是上覆 Grayburg 组与 San Andres 组间的角度不整合。在测井记录中识别这个不整合是困难的。3D 地面地震资料中只能在区域规模上分辨出来。

宽井距(1202 井—1080 井)的反射图象, 除信噪比较差外, 与图 2 中显示的窄井距的反射图象是相同的。

Bashore 等人(1995 年)在应用地质统计技术的概念验证练习中证明了能够如何用井间 P 波反射图象得来的振幅提取更多的有关储集层孔隙度和渗透率分布的信息。目前我们正努力

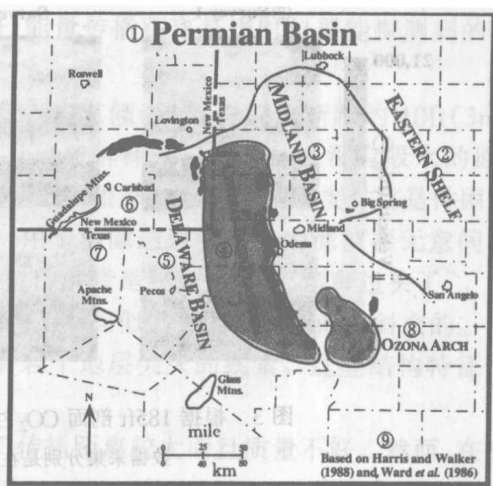


图 1 西得克萨斯 Permian 盆地的古地理轮廓, 及 Graybury 组产油的主要油田(黑色范围)

①Permian 盆地; ②Eastern 陆棚; ③Midland 盆地; ④中央盆地地台; ⑤Delaware 盆地; ⑥新墨西哥; ⑦得克萨斯; ⑧Ozona 背斜; ⑨据 Harris 和 Walker(1988)和 Ward 等(1986)

CO₂ 气驱开始前, 我们采集了两套几乎相同的数据集, 以便测试该方法的重复性。这两套数据集是相隔 14 个月采集的。

图 3 为 185ft 剖面在 CO₂ 气驱前两次测量的 P 波速度的层析成像图, 它们是根据透射波旅行时计算的。储集层是 Graybury 组中的低速区, 厚度为 100ft, 其深度为 2850~2950ft 之

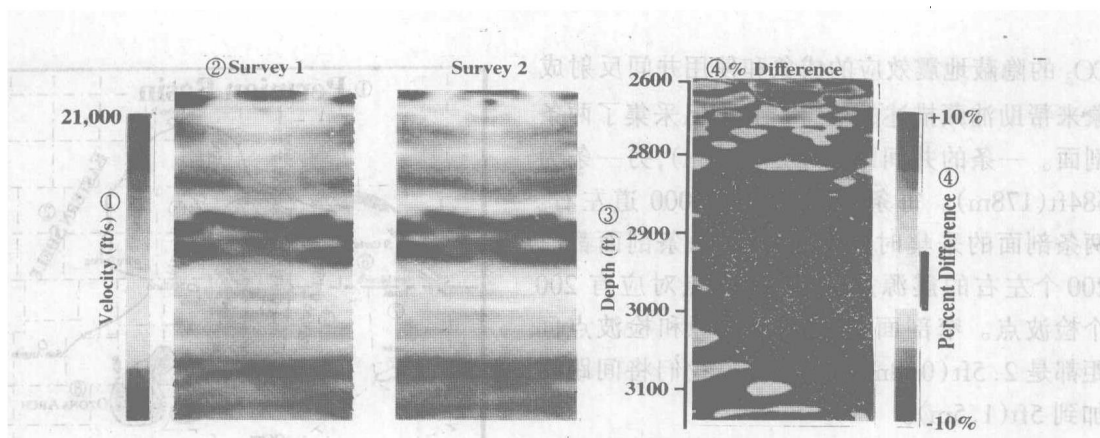


图3 根据185ft剖面CO₂注入前两次测量计算的速度层析成像图

数据采集分别是在1991年12月和1993年2月，
两者之差即全过程的重复性显示在右图(低于2%的误差染黑)

①速度(ft/s);②测量;③深度(ft);④百分比误差

把他们的方法推广到S波图象,且通过岩心研究来查明储集层中见到大量反射的原因。

研究事例2:水驱项目

我们的第二实例是取自东面陆架西边缘上一个的油田的水驱项目(见图1),储集层为Clear-fork组中300ft(91m)厚的层段中,也是碳酸盐岩。从一口井到下一口井的注入速率是不能预测的。由测井资料获得的信息来解释它是相当困难的。3D地面地震数据表明朝着Midland盆地地层轻微地向倾斜。但地震分辨力相当于产层本身厚度的一半。我们采集了4口注水井间的3条井间剖面,如图5所示。我们选择这种观测布置是为了获得没有吸水的井周围的3D透视。每口井的平均注水率以每天的加仑(1gal=3785cm³)数来表示。

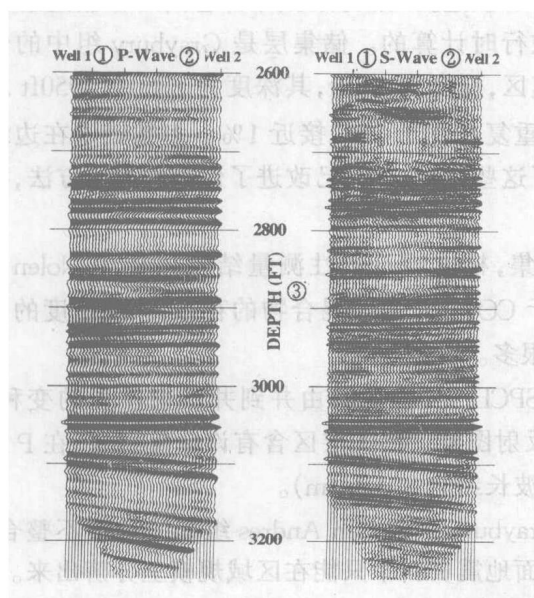


图4 185F剖面使用Lazaratos算法计算出的P波和S波反射图象

①井;②波;③深度(ft)

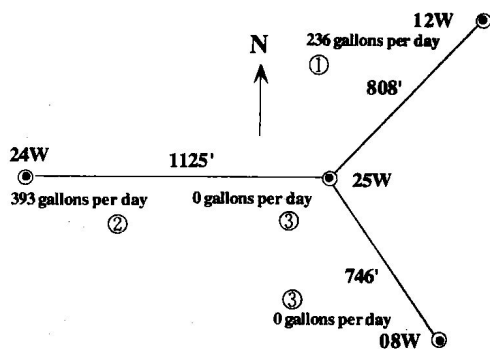


图5 水驱研究中连接4口注水井的3条井间剖面示意图

①236gal/d, 1gal=3785cm³; ②393gal/d; ③0gal/d

两条剖面的反射图象如图6所示,这两条剖面近似正交,但给出南北方向为主的区域透视。储集层的顶部深度为2840ft,其特点是薄纹层状。这层中的特征波长大约15ft(46m)。

1993年底,我们采集这些资料时,752ft

(229m)和 802ft(244m)的井距(译注:与图 3 不符)能量传播距离是当时仪器能探测到的最大距离。这就引起剖面中间所见到的不好信噪比。

这些反射图象表明,注水井 25W 附近可能有一些东倾断层,它们的断距约 10ft(3m)左右。这些断层能破坏各个地层中的流体流动,这有可能解释这口井为什么没有吸水的原因。这些已解释的断层中有些已用重叠在剖面上的白线表示由来。井与断层连接对比是件困难的事,其部分原因可能在于我们现行的处理方法——用于消除透射波初至的滤波器无意间滤除了震源井与检波器井的几英尺范围内的反射。另外的解释是我们把图象“解释过头了”。这些断层的真倾角多半要比每个剖面上的视倾角大。两条剖面似乎都是与断面倾向斜交的。

许多反射层中似乎还有大约 1° 的西倾,并且有若干地层尖灭的线索。这些结构特征也可能影响水驱响应。

我们没有显示其他剖面的反射图象,因为它们传播距离较大而且质量不好。然而,在这些剖面中可以看到许多地层的轻微西倾和尖灭的存在。

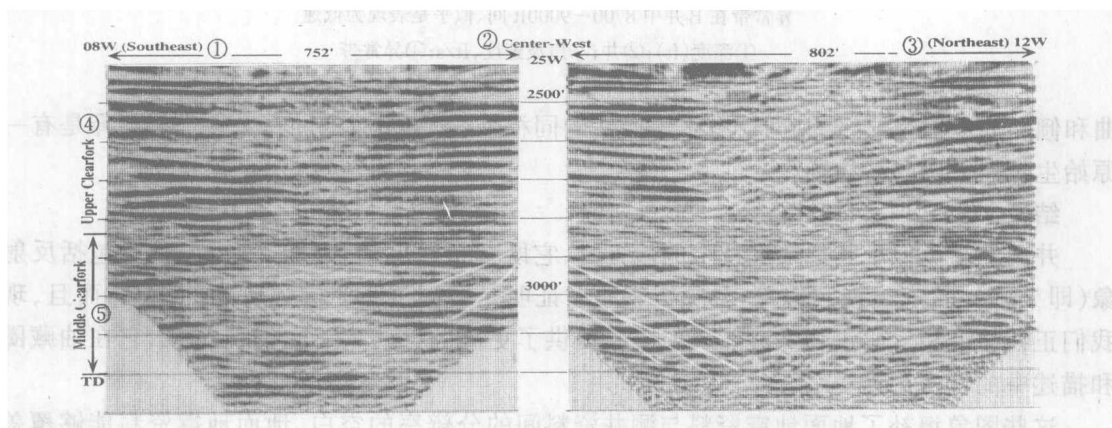


图 6 中间注入井,周围两条剖面的 P 波反射图象

我们推测,储集层范围内注水井附近存在着一些断层,并用白线标示。

①南东;②中心—西;③北东;④上 Clearfork;⑤中 Clearfork

研究事例 3:使“异常”成象

Midland 盆地中采集的现代 3D 地面地震资料显示了富含碳酸盐岩的 Woldcamp(狼营组)中的细微的振幅异常,这些异常处于地震分辨率的临界边缘,并且有时含有储集层品质的碳酸盐岩。由井获得的信息,不管穿过这些异常与否,只给出不完全的解釋。穿过“异常”的一口井遇到了块状石灰岩单元,而附近的井在同一深度遇到富含硅屑的碳酸盐岩,那么哪一口井可解释为岩屑。感兴趣的是这些“异常”的内部结构和它们与周围地层的关系。出现了用井间测量解释这个问题的机会,因为有两口井适用于研究,一口井已穿过了异常而另一口井错过了异常,而它们仅相距约 640ft(195m)。

根据透射能量计算的速度层析成象图,展示在图 7 中。我们把每口井声波测井记录显示在层析成象图的两侧。异常对应于 B 井中深度为 8700ft 和 9000ft 间的范围。

层析成象图勾绘出一个椭圆形的、从 B 井延伸到两井中间左右的低速区。这些碳酸盐岩中的低速往往与高孔隙度有关。相应的反射图象也显示在图 7,它显示出低速区范围内水平产状的内部结构或地层及其外部和到左边的相对水平产状结构,但在横穿边界的地层中有些不连续。在低速区以下和深约 8900~8850ft 间是两个细小地层特征,它们相距约 300ft,由弯

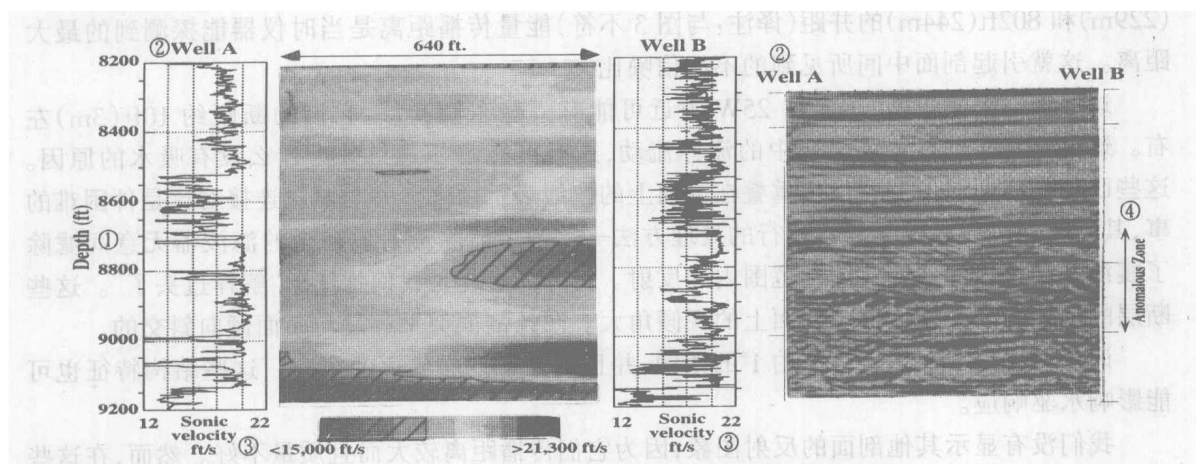


图7 碳酸盐岩异常的层析速度图象和相应的反射图象

异常带在B井中8700~9000ft间、似乎是表现为低速

①深度(ft);②井;③声波速度,ft/s;④异常带

曲和倾斜的反射组成,但其间伴有水平产状的同相轴,这两个特征的一个合理的解释是有一些原始生长的分离的动物群。

结论

井间地震类似于其他地震技术的地方是,它既包括速度估计(即层析成像)也包括反射图象(即 VSP—CDP 变换和偏移)。层析成像已证明是监测蒸气驱的强有力的工具,而且,现在我们正在用混相气驱进行试验。反射图象提供了更高的分辨率,而且正在揭示它在油藏圈定和描述中的许多用途。

这些图象填补了地面地震资料与测井资料间的分辨率的空白,地面地震资料能够覆盖储集体积的小部分,但分辨率相对较差,测井资料和岩心资料分辨率很高,但数据覆盖范围相对较小。我们对井间成像的一个希望是填补这个分辨率的空白。帮助我们将更多的传统数据类型连在一起,同时以极好的分辨率供我们了解储集层状态。

井间反射成像还处在萌芽状态,第一个反射图象是 1992 年才从西得克萨斯的 Permian 盆地采集的资料中获得。从此,成像技术取得显著的进展。本文中显示的图象在受益于处理技术的改进后还会提高。

在这些反射图象中看到的一些特征解释是抽象的,因为它们来说,我们的经验有限。然而,很明显,我们不大可能从较传统资料,例如 3D 地面地震资料或测井记录获得这些细微的特征。

自从我们采集了这些实例中的数据以后,已推广应用了频带更宽、功率更大的震源。这些设备应该产生大井距的高质量数据。另外多道检波器串现已开始用于同时采集几条剖面,这就降低了采集费用。

高章伟 译