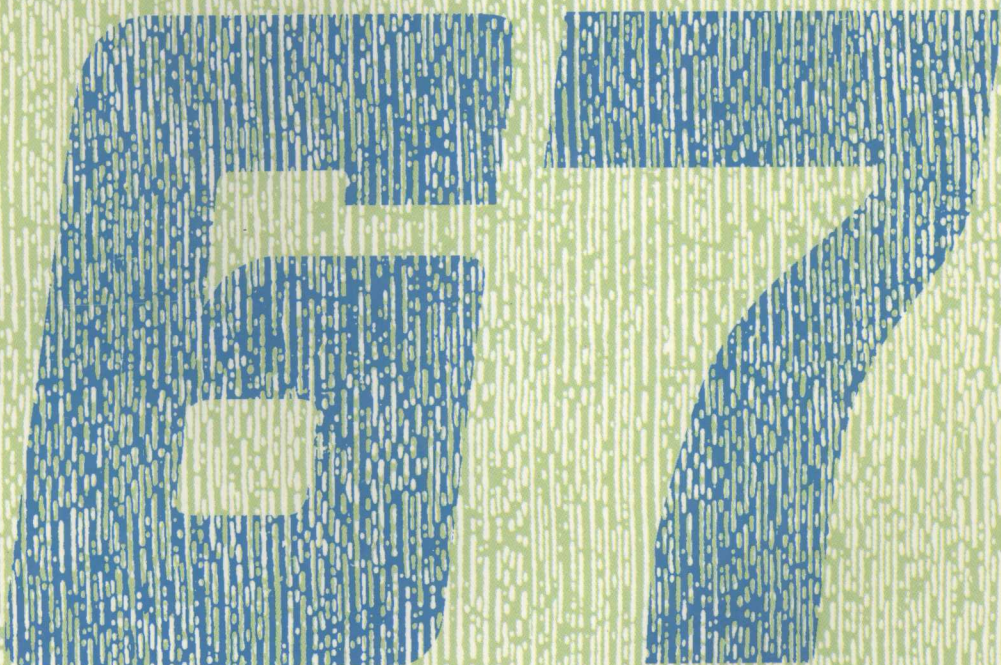


# 美国勘探地球物理学家学会 第 67 届年会论文集

中国石油天然气集团公司 研究院信息中心  
地 球 物 理 勘 探 局 译

中国新星石油公司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 67 届年会论文集

中国石油天然气集团公司  
地球物理勘探局 研究院信息中心 译  
中国新星石油公司石油物探研究所情报室

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 1997 年 11 月上旬在美国得克萨斯州达拉斯市举行的第 67 届年会上所发表的部分论文的详细摘要。内容包括：地震采集、AVO 技术、地震解释、储层特性、岩石物理、地震处理、地震理论等方面的最新成果和我国部分参加会议的专家撰写的专题综述。

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 67 届年会论文集/美国地球物理勘探学会编；  
中国石油天然气集团公司地球物理勘探局研究院信息中心，  
中国新星石油公司石油物探研究所情报室译。  
北京：石油工业出版社，1999. 1

书名原文：Expanded Abstracts with Biographies 1997 Technical Program  
ISBN 7-5021-2485-3

I. 美…

II. ①美…②中…③中…

III. 地球物理勘探-美国-学术会议：年会-文集

IV. P631-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 00087 号

Expanded Abstracts with Biographies  
1997 Technical Program  
©1997 Society of Exploration Geophysicists

\*

石油工业出版社出版  
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)  
北京密云华都印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 624 千字 印 1—1000

1999 年 1 月北京第 1 版 1999 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2485-3/TE·2042

定价：50.00 元

## 序

美国勘探地球物理学家学会第 67 届年会于 1997 年 11 月上旬在美国得克萨斯州达拉斯市召开。来自世界各地的勘探地球物理学家们就地震理论和方法、地震数据采集和处理、岩石物理、储层特征描述、解释,以及重、磁、电等方面的地球物理问题进行了广泛的交流与探讨,还对 P 波地震方位各向异性、地震属性技术、四分量地震技术以及利用地震数据预测孔隙介质中流体压力等新领域的问题进行了专题讨论。

经与中国石油天然气集团公司地球物理勘探局研究院信息中心和中国新星石油公司石油物探研究所情报室商定,本届年会论文集的中译本在往年工作的基础上增加了 8 篇由与会专家撰写的综述,旨在帮助读者对 SEG 年会的内容有一个全面的了解。这项工作是在中国石油学会勘探地球物理专业委员会的指导和支持下进行的,借此谨向孟尔盛等学会领导和有关专家表示感谢。

本届年会论文集中,中国石油天然气集团公司地球物理勘探局研究院信息中心组织翻译的论文由俞寿朋、朱衍镛、胡钦安、陈炳文负责审校;中国新星石油公司石油物探研究所情报室组织翻译的论文由高林、杨勤勇、严建文、周玉山负责审校。

编 者

1998 年 9 月 30 日

# 目 录

|                                                           |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| 专题综述                                                      | (1)   |
| 有关“野外采集”和“近地表”的部分论文综述                                     | (1)   |
| 从第 67 届 SEG 年会看井下地球物理技术的发展                                | (3)   |
| 有关非地震勘探论文的简单介绍                                            | (7)   |
| 地震解释论文综述                                                  | (9)   |
| 油藏表征论文介绍                                                  | (15)  |
| 地震数据处理部分综述                                                | (19)  |
| 地震反演理论部分综述                                                | (23)  |
| SEG 第 67 届年会讨论演示专题                                        | (27)  |
| 地震采集                                                      | (30)  |
| 海底电缆 (OBC) 资料的分解                                          | (30)  |
| 多波束测深法在区域地质和地球物理勘探中的作用                                    | (34)  |
| 基于网络的地震服务                                                 | (37)  |
| 影响空间分辨率的因素                                                | (41)  |
| 最佳分辨率的 3D 地震勘探设计                                          | (45)  |
| 获得更加均匀的炮检距和方位采样的勘探观测系统                                    | (49)  |
| 对速度线性变化介质中地震采集参数的研究                                       | (53)  |
| Patagonian 沙漠复杂的三维过渡带勘探: 史例                               | (58)  |
| 重复 3D 地震勘探对于观测系统变化的敏感性——一个可控试验                            | (61)  |
| 通过野外预处理提高分辨率及对地震质量的保证                                     | (65)  |
| 在资料品质很差地区的二维线束采集                                          | (69)  |
| 亚平宁山脉中部的 3D 普查                                            | (73)  |
| Ariyalur—Pondicherry 洼地的风化层结构及其对地震数据的影响                   | (77)  |
| 地震分辨率与检波器地面耦合                                             | (80)  |
| 日本一个困难地区的三维地震试验                                           | (84)  |
| AVO 技术                                                    | (89)  |
| 近地表结构、散射和 $Q$ 对 AVO 测量值的影响                                | (89)  |
| 由边缘 3D 陆上地震资料进行 AVO 研究的成功实例                               | (92)  |
| 在 AVO 分析中消除与偏移距有关的调谐现象                                    | (96)  |
| 科罗拉多州 Rulison 气田实例研究: 利用 P 波反射地震资料对一套天然裂缝含气储层进行裂缝检测、作图和分析 | (102) |
| 井下地球物理                                                    | (106) |
| 综合应用由 VSP、井间地震和实验室获得的速度数据检测裂缝带                            | (106) |
| 由交叉偶极测井数据反演横波各向异性: 方法和实例研究                                | (110) |
| 伪 VSP: 一个三维实例                                             | (113) |
| 用单井高频地震系统在准水平井中高分辨率成像                                     | (117) |

|                                                                             |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|
| 用多级多盘片型井下震源做井间测量.....                                                       | (120) |
| <b>地震解释</b> .....                                                           | (124) |
| 3D 频率—时间分析：地质应用 .....                                                       | (124) |
| 用于地震层位拾取的 Hopfield 神经网络 .....                                               | (127) |
| 井资料与三维叠后偏移地震的结合.....                                                        | (131) |
| 南里海地震阴影区的新的成像方法.....                                                        | (134) |
| 利用地震属性作为储层特性与流体饱和度的预测标志进行石油勘探.....                                          | (136) |
| CIS 地区俄罗斯西西伯利亚的 Priobskoye 油田和对利用振幅或者层速度勾划高产层的<br>(C) 最新 3D 地震所作的初始评价 ..... | (139) |
| 利用人工神经网络研究 Ekofisk 地区断层和断裂的分类 .....                                         | (142) |
| 利用地震属性绘图、地震反演和 AVO 等技术圈定南非海上 Bredasdorp 盆地的<br>(CS) 油气田范围.....              | (144) |
| 印度尼西亚石油勘探和生产的地球物理活动的现状和展望.....                                              | (147) |
| 堪萨斯州西南部莫罗组河道砂岩的发现：3D 地震与层序地层学成功结合的范例 .....                                  | (150) |
| 得克萨斯州西部 Pegasus 油田储层结构和孔隙度分布——用神经网络进行层序地层学<br>(D) 和地震属性综合研究.....            | (153) |
| 墨西哥湾深水地震振幅的勘探意义.....                                                        | (156) |
| 碳酸盐岩储层和地震属性：如何使之联系更紧密？ .....                                                | (160) |
| 在三维可变线性速度场中连井和地震资料的意义.....                                                  | (163) |
| 3D 地震在全球性转变中的作用 .....                                                       | (166) |
| 地震属性技术的进展.....                                                              | (170) |
| <b>储层特性</b> .....                                                           | (175) |
| 确定诱导的微地震事件簇中的结构.....                                                        | (175) |
| 综合研究面临的挑战：综合有关含油气储层的不同观点.....                                               | (178) |
| 利用三维地震反演和三维地质统计学估计孔隙度.....                                                  | (181) |
| 墨西哥湾南 Timbalier 295 油田的四维时间延迟地震监测 .....                                     | (185) |
| 四维三分量地震学和储层动态表征法——地震普查.....                                                 | (189) |
| 根据四维多分量地震属性分析进行 San Andres 碳酸盐岩储层表征 .....                                   | (192) |
| 评价 4D 地震项目的技术风险 .....                                                       | (195) |
| <b>岩石物理</b> .....                                                           | (200) |
| 走向 APE 时代——意义和应用 .....                                                      | (200) |
| 裂隙引起的地震各向异性的数值研究.....                                                       | (203) |
| 孔隙流体连通对地震各向异性影响的模拟.....                                                     | (207) |
| <b>地震处理</b> .....                                                           | (211) |
| 子波不稳定性：问题和风险管理策略.....                                                       | (211) |
| 用局部优化的简化叠加功率法估算大静校正量.....                                                   | (215) |
| 墨西哥湾深度成像的实际条件——史例研究.....                                                    | (218) |
| 空间假频和不规则间隔地震数据的道内插法.....                                                    | (221) |
| 用有噪地震数据作 AVO 分析时的 3D 陆上数据处理流程：史例 .....                                      | (223) |
| 复地震道属性的遗传分类.....                                                            | (227) |

|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| 3D 克希霍夫 DMO 算子的带限空间内插: 振幅保持的关键 .....    | (230) |
| 用 P 波反射地震对天然裂缝气藏进行裂缝检测、成图和分析 .....      | (233) |
| 方位各向异性介质地震旅行时分析 .....                   | (236) |
| 针对三维地震测量和处理的 seismic 成像方法的评价 .....      | (241) |
| 地形条件恶劣地区两种确定基准面方法的比较 .....              | (245) |
| 应用相位筛分传播算子对复杂 2D 构造进行叠前深度偏移 .....       | (249) |
| 用地质统计学改善地震速度: 实例研究 .....                | (253) |
| 用奇异值分解方法压缩地震叠加剖面 .....                  | (256) |
| 复杂地质情况的深度成像策略 .....                     | (260) |
| 3D 叠前地震偏移对地震属性分析的影响 .....               | (262) |
| 陆上 3D 数据中与地面有关的多次波消除 .....              | (266) |
| 大规模并行机上的地震成像 .....                      | (270) |
| 在共享存贮系统上进行多路线并行地震处理 .....               | (274) |
| <b>地震理论</b> .....                       | (279) |
| 建造规范模型的快速、高效方法 .....                    | (279) |
| 将偏移应用于 WARP 数据的解释 .....                 | (282) |
| 重访逆波场外推: 单值和多值算子的限制 .....               | (285) |
| 用井间 qP 和 qSV 波的旅行时进行各向异性介质的统计层析成像 ..... | (289) |
| 叠前反演: AVO 在岩性和烃类流体定量评价中的扩展应用 .....      | (294) |
| 地震数据叠前波场反演中的几个实际问题 .....                | (296) |
| 半弹性平面波深度偏移和速度分析 .....                   | (300) |
| 用神经网络进行地球物理非线性非唯一性反演 .....              | (303) |
| 综合井、地震和沉积学资料的地层反演 .....                 | (307) |
| 对地震成像中地下照射的新看法 .....                    | (311) |
| 地震图象的分辨率: 都是视觉问题 .....                  | (313) |
| 弹性各向异性观测资料的综合: 地震运动学数据的约束反演 .....       | (316) |
| 用旁轴波动方程的最佳有理逼近进行成像 .....                | (319) |
| 有限差分叠前深度偏移的实际问题 .....                   | (323) |
| 速度延续性和叠前剩余偏移剖析 .....                    | (326) |
| 利用波速参数化的三维程函方程的快速精确有限差分分解 .....         | (331) |
| 三维旅行时和振幅的精确有限差分计算 .....                 | (334) |
| 用惠更斯原理进行射线追踪 .....                      | (338) |
| 根据层位叠前深度偏移进行速度和照度研究 .....               | (341) |
| 对稀疏的陆地数据进行三维叠前深度偏移和速度分析 .....           | (346) |
| 连续的 3D 叠前深度偏移速度分析 .....                 | (348) |
| 薄层固有各向异性介质中与频率有关的横波分裂 .....             | (351) |
| VSP 资料的 3D 层析反演和深度偏移 .....              | (355) |
| 应用立体层析成像估算宏观速度模型 .....                  | (357) |
| 自相关图偏移 .....                            | (361) |
| 用地震面波反演确定横波速度 .....                     | (364) |



|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| 专题研究.....                                    | (367) |
| 利用核磁共振对孔隙几何形态和孔隙进行特征描述.....                  | (367) |
| 观测系统、大规模构造和区域各向异性对 AVOA 的影响: 风河盆地的一个实例 ..... | (369) |
| 用地震数据的速度和声阻抗反演对地压岩石进行成像.....                 | (373) |
| 布莱克福特油田三维三分量地震勘探实例研究.....                    | (374) |
| 利用相似性图对地震属性进行综合分析: 两个史例.....                 | (378) |



## 专题综述

### 有关“野外采集”和“近地表”的部分论文综述

刘全新

野外采集本年度年会报告“野外采集”部分发表文章分为五个专题：(1) 海上导航定位和采集设计；(2) 三维勘探设计；(3) 海上采集及处理；(4) 陆上采集方法；(5) 陆上勘探史例研究。与往年相比其特点是：新——推出不少新的采集方法和勘探实例；深——论文中不乏有关于采集理论研究和用数学计算方法进行采集系统设计的研究。在这里我们向大家推荐以下有关 3D 采集的研究文章：

- (1) 影响空间分辨率的因素；
- (2) 最佳分辨率的 3D 地震勘探设计；
- (3) 地震组合原理和 3D 地震记录道的快速计算；
- (4) 如何设计一种勘探观测系统的几何形状，以获得更为均匀的炮检距；
- (5) 3D 地震勘探设计和线性  $v(z)$  函数；
- (6) 线性速度介质的地震采集参数；
- (7) 什么是 DMO 覆盖；
- (8) 根据 CMP 方法对 3D 波场采样。

《影响空间分辨的因素》、《最佳分辨率的 3D 地震勘探设计》两篇文章是讨论地震勘探的空间分辨率的，这对于用地震方法勘探小构造、断层等横向相对小尺度的勘探目标是很有意义的。文中认为影响分辨率的因素有地震波频率、震源的几何形状与组合、采样间隔，以及覆盖次数和成像参数，当然任何分辨率都会受到干扰因素的影响。并导出了求取视分辨率（或实测分辨率）的公式。讨论这些问题的目的是为了根据勘探目标所要求的分辨率，取最低成本，在勘探之前就能设计出能达到勘探要求的采集系统。文中指出，如果能够实现合理采集设计，可以用以往的采集资料反演先验的地质模型，显然与分辨率关系极大的波数是慢度的简单函数，而慢度又关系到绕射点处的入射、反射和散射，这些均是影响成像的因素，我们可以通过反演先验地质模型而导出 3D 野外采集的设计。文中采用了 Beylkin 等专家的反演求解公式。

《地震组合原理和 3D 地震记录道的快速计算》、《根据 CMP 方法对 3D 波场采样》、《如何设计一种勘探观测系统的几何形状，以获得更为均匀的炮检距》三篇文章分别从不同角度讨论了如何进行 3D 地震采集设计，以得到好的偏移输出剖面：降低组合噪音，克服空间假频，使方位角、炮检距均匀，以在合理成本情况下取得清晰成像效果等。首先，输出成果质量之好坏，受到组合的影响。我们在当前多道采集，多次覆盖的情况下，仍然要重视组合参数的

计算,文中介绍了用傅里叶变化的办法,分析有效波带宽和噪音带宽,以便有效地压制噪音和保护有效波的快速计算方法。其次,文中认为要获得高质量的叠加和偏移成像结果,要求采集参数(炮检距、方位角、覆盖次数)在三维方向上相对均匀。但野外采集有时受到地面条件影响,如果保证反射面元达到以上“三个均匀”就必然要增加激发和接收点数,而这在经济上又是不划算的,因此提出了“多大的方位角、何种几何形状对于成像最有利呢?”的问题。一般地说,只有足够的采样密度和均匀分布的覆盖次数、方位角、炮检距,其成像效果才好,而且有利于克服各向异性影响。从客观条件和经济方面的考虑,影响到我们采用稠密的采样,均匀的方位角和偏移距的实施时,我们可以考虑以下采集方案作为弥补:

(1) 增加排列线数和缩小检波道距,这总比增加激发点密度要经济。

(2) 在不同倾角,不同方位上采用不同的空间采样率和不同的偏移距。

文中从以上认识出发,推导出在不同地质条件下,不同的采集系统(几何形状),并给出了平均叠加计算公式。

《什么是DMO覆盖》一文,与上文讨论问题有相似之处——在倾斜反射界面情况下如何实现叠加面元的均匀叠加次数?如何克服倾角时差对成像的干扰?这似乎是人们熟悉而并未真正仔细研究的问题。首先是DMO覆盖的定义,有人把DMO覆盖定义为对叠加合成面元输出道的有效输入道数即有能量贡献的总道数。在3D情况下,当反射界面倾斜时,不同方位角的输入道对于输出响应的贡献是不同的。有些道对有效反射起相长干涉作用,而有些道只会对有效反射起相消干涉作用,甚至,对噪音起相长干涉作用,形成有害干扰。解决这个问题有不同的方法。(1)一般我们在处理时用DMO算子对输入道求DMO响应,然后作NMO叠加,这对于2D是可行的,但在3D情况下则要复杂得多。(2)有人提出先求出不同走向相对先验地质模型的加权因子,对不同贡献输入道施加不同加权因子。(3)更有利的办法是设计出非规则的、随机采样的观测系统,对不同方向的输入道用不同的采样密度和偏移距。文中给出了用DMO分析的办法,计算DMO补偿因子的具体计算方法,并讨论了DMO倾角覆盖范围和偏移孔径问题。

### 关于“近地表”问题

该问题分为两个专题:(1)测地雷达(GPR)方法及其应用;(2)近地表地震解释。

两专题共计有14篇文章,特别使我们感兴趣的是测地雷达应用于解决近地表问题,无论从方法理论还是应用效果上都取得长足的进步。在用传统的地震方法解决近地表问题方面也取得了一些实质性进展。在这里我们推荐以下文章:

(1) 运用叠后时间再偏移对测地雷达数据偏移成像扫描;

(2) 动力相雷达:一种地质调查新技术;

(3) 西印度群岛巴巴多斯哈里森洞穴GPR影象;

(4) 横切德克萨斯伽尔威斯顿岛边滩的测地雷达调查;

(5) 橡树岭油藏M.V废弃物地区近地表地震反射及成像研究。

《运用叠后时间再偏移对测地雷达数据偏移成像扫描》一文,介绍了一种测地雷达数据时间偏移的新的算法。

本文介绍了运用一个钢筋混凝土构成的模型,获得GPR数据,并实现时间偏移的例子。

首先,测地雷达使用电磁波辐射渗透原理,测量浅表结构,其频率范围为 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^9 \text{ Hz}$ ,电磁波传播是由电导率和磁导率控制的,其在介质中的传播速度为 $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ ,式中, $\epsilon$

和  $\mu$  分别为介质的电常数和磁导率。像地震偏移一样, GPR 数据偏移, 同样运用波动方程, 而且也是应用自上向下延拓的“递时偏移”方法, 即从地表接收波场, 向下逐层将反射和散射能量延拓到地下界面上不同的反射和散射点。尽管我们也许可以得到可靠的偏移速度, 而且深度偏移更为需要, 但目前对于 GPR 数据, 应用得更多的还是时间偏移。这是因为电磁波的速度和频率要高得多, 略有误差就不可能实现深度偏移。为了求取偏移速度, 文中采用了再偏移或称为串级偏移的方法, 即选取零偏剖面为标准, 对非零偏剖面实施偏移扫描, 当两者接近即获得较为精确的速度, 再用这个较为精确的速度做偏移, 这显然是一个迭代过程。文中具体叙述了偏移实现过程和公式。

测地雷达, 由于其工作速度快, 成本低, 非破坏性等特点, 深受工程地质工作者欢迎, 被广泛地应用于公路、桥梁、工程建筑地基探测、地下隧道和武器探测, 近年来被应用于地震勘探的近地表结构勘探, 具有良好前途, 但是, 由于这种方法有以下缺点影响了其应用和推广:

(1) 通常这种成果信噪比不高, 仅能识别主要部分, 剖面中高频干扰严重。

(2) 缺少准确速度资料, 通常以微测井控制, 其结果是时间剖面, 仍不能绘出用户所需的精确深度剖面。

(3) 为了解决这些问题, 微处理系统要能够采用类似于地震勘探的速度分析和 NMO 叠加技术, 使成果改进。

关于 GPR 方法, 文章《西印度群岛巴巴多斯哈里森洞穴 GPR 影像》是一个解决近地表结构的很好实例。

《像树岭油藏 Melton Valley 废弃物地区近地表地震成像及反射研究》一文, 是一篇关于近地表地震解释的实例。

在美国田纳西州, 像树岭油藏位于诺克斯维尔以西约 15mi, 这个地区因地表有各种研究设施、采油设施、废弃物处理装置及森林, 给地表应用炸药震源进行地震勘探造成了困难, 因此使用了可控震源, 30~300Hz 非线性扫描, 扫描长度 10s, 1ms 采样, 道间距 2.4m, 48 道仪器。这篇文章主要是介绍如何正确解释该地区极为复杂的地质结构, 如浅层的渗透性、非渗透性、半渗透性地层, 识别地下水流通道——裂隙分布等, 对于常规地震勘探和解释这是不可能解决的, 这是一个浅层精细地震解释的一个极好的例子。

从 SEG67 届年会的论文来看, 野外采集部分介绍设备的文章不多。但总体趋势是向多道采集, 非规则三维, 根据地质任务计算机设计观测系统, 定量化分析方向发展。而“近地表”部分的文章大量地是介绍 GPR “测地雷达”解决浅表地质结构应用的, 西方地球物理勘探发展的动向应当引起我们的关注。

## 从第 67 届 SEG 年会看井下地球物理技术的发展

曾 忠

第 67 届 SEG 年会有关井下地球物理技术的文章共 29 篇, 分为三个专题。第一个专题为层析和非人工地震震源成像; 第二个专题为震源、观测系统和模型; 第三个专题为测井和



VSP。下面主要就井中地震和 VSP 两方面的文章向大家作一介绍。

### 井中地震

井中地震的发展已有十几年的历史,从 80 年代中期到 90 年代,随着层析成像技术的引入,井中地震,特别是井间地震成为了 SEG 的热门话题,各大油公司都纷纷给予资助。但进入 90 年代以后,受各方面的影响,研究经费被缩减,井间地震的研究受到了一定影响,反映在 SEG 上,井中地震的论文有所减少。尽管这样,从本届年会提交的论文可以看出,围绕阻碍井间地震发展的主要问题,研究人员仍在进行着坚持不懈的努力,并取得了突出的进展。下面就此进行简要的介绍。

### 井中采集设备

井中震源一直是阻碍井中地震发展的重要因素,本届 SEG 有两篇文章专门介绍了在井中震源方面的研究进展。其中 Paulsson 地球物理服务公司研制的高能量、宽频带、推靠式的液压可控震源受到了普遍关注。该公司的创建人 Bjorn Paulsson 为前雪佛龙石油公司的研究人员,曾在第 66 届 SEG 上介绍了该震源的设计思路,并在北京举办的 15 届石油大会上进行了展示。利用该系统,该公司于 1997 年 3 月进行了第一次野外实验,5 月又在东得克萨斯进行了第一次商业服务。

该系统现已完成了轴向可控震源和径向可控震源的研制,据称,其井间距可达 6000ft 以上,井深可达 2 万 ft<sup>①</sup>。本文主要介绍了在加利福尼亚的 La habra 雪佛龙实验基地进行第一次野外实验的情况。两口井分别为 2000ft 深,井距为 400ft,在 500ft 深获得了一个共炮集,其检波器的埋深在 150ft 至 1500ft 之间,其检波器的间距为 10ft。利用该系统,在固结性差的,低速的,并且是低 Q 的砂岩和粉砂岩的实验环境中,记录到了宽带的(频带为 10~800Hz),高振幅的直达 P 波和 S 波。接收装置采用的是 Exxon 开发研究机构推出的 5 级、推靠的、3 分量水声检波器阵列,它采用了 Litton 工业指导和控制系统部门研制的全光纤声波传感器(据称可作到 80 级)。它具有抗电磁干扰和随机噪音能力强,易设计,成本低等特点。另外,由于在井下没有电子元件,因此性能更加可靠。同时,还具有电缆轻便,体积小,可直接卷于生产管中,并能承受 300°高温和 10000psi 的压力等优点。

值得一提的是,1997 年由中国石油天然气总公司开发局组织,西安仪器厂和北京石油勘探开发研究院机械所在吉林油田分别利用他们研制的井下震源进行了井间地震的实验。其中西安仪器厂利用其研制的直线电机加速式重锤震源和 3 级 9 分量遥测接收系统,成功地完成了两对井的试验和试生产工作,其井间距为 130m,井深 450m,接收井段 160m 至 410m,接收点距 2m。

### 观测系统

成本较高,一直是困扰井中地震发展的重要障碍。如何通过改进观测系统,降低成本,并仍能获得较高分辨率的资料,一直是研究者们致力研究的课题。这次会议提出的几种方法,可供大家开拓思路。

(1) 得克萨斯大学经济地质局的 JAMES L. SIMMONS 等设计了一种能够降低成本的井间层析成像方法,他们采用两个常规的变井源距 VSP 来模拟井间层析成像实验(TVSC),并利用最小二乘法来反演 VSP 波场的初至,以建立井内的速度模型。合成数据和实际资料都证实了这一算法的可行性。

<sup>①</sup> 1ft=0.3048m。

(2) Utah 大学的 F Meng 进行了一个有趣的实验。其基本方法是：震源放在地面，将一个象井下设备的障碍物放于井中，利用地面震源产生的入射能量在井孔内转换为的套管波，井中的障碍物作为二次震源，将套管波转换为体波，被检波器接收。通过计算套管波响应，建立分辨率较高的两井之间的速度成像。

该障碍物的放置点被称为套管波震源点。被记录的体波包括从地面震源来的一次波场和套管波响应。这样可以产生一系列的 CSP 道集。如果震源子波和强度没有发生变化，则从地面震源所激发的波场是一样的，称为背景波场。知道了背景波场后便可从记录的波场中得到纯的套管波响应。

他进行了数值实验，通过从合成的井间数据体中计算的套管波响应，对两井之间建立了分辨率较高的速度成像。同时，他也从野外的井间数据中成功地计算出了套管波响应。

#### 处理算法

处理算法的研究一直是井中地震研究较活跃的领域，这里着重介绍日本东京大学在不均匀介质中利用叠加速度分析进行井间 CDP 叠加和衍射叠加的基本思路：

该方法是在地面地震的叠加方法的基础上提出的，由于该方法对速度不太敏感，因此对复杂构造的成像具有一定意义。可以作为不均匀介质精确成像前的第一步。

常规的井间反射波成像可通过波场分离和 VSP-CDP 处理获得高分辨率的地下成像。但对不均匀介质，却难以获得它所要求的高信噪比资料。在这种情况下，要清楚地分离反射波和绕射波是非常困难的。而叠加速度分析则可以用来在复杂的波场中识别反射波和绕射波的特征。在本文中，叠加速度被修改并应用于井间地震勘探，进而用来识别绕射同相轴的反射特征。该方法的缺点是由于该方法对速度不太敏感，因此对复杂构造不能精确成像。

除此之外，本届年会还介绍了几种方法：针对远、近场采用不同形状和大小的网格利用双域有限元 (FD) 方法对 VSP 或井间地震建立模型；井间地震数据的映射后偏移；使用遗传算法进行跨孔层析成像。

#### 野外实例

随着井中地震技术日趋实用化，井间地震的野外实例也日益增多，下面介绍其中的一个实例。

MIT 地球研究实验室提供了一个非常有意义的实例。在靠近 TRAVERSE 市的 MICHIGAN 盆地，MIT 有两口试验井，中间夹着一个塔礁，为一已知油藏，正为壳牌石油公司所开采。在这些年中，ERL/MIT 已获得了塔礁上的各种地震数据体，包括 3D 反射波法勘探，VSP 和井间实验。但由于分辨率的限制，均只提供了礁体上的碳酸岩层的情况，而并不知道礁体本身的情况。因此无法估算储量和储层描述。1995 年，ERL/MIT 进行了第二次井间试验，采用了 CONOCO 的轨道可控震源 (orbital vibrate) 和三分量检波器，记录范围达 4000ft，频带为 70~380Hz。震源能产生 P 波和 S 波能量。INLINE 震源所产生的  $H_1$  分量中 P 波占主要地位，CROSSLINE 震源所产生的  $H_2$  分量中 SH 波占主要地位。

他们通过过去的 P 波速度模型，利用射线追踪方法，对观测系统的参数进行了优化，以增加射线的覆盖范围。并采用了新的井间层析方法对 P 波和 S 波进行了重建，获得了各自的层析图。该方法为一种非线性的旅行时层析成像方法，它利用一种以构造为基础的波前方法来计算已知速度模型的旅行时，其原理是利用图论来从震源展开波前，并通过整个模型来计算旅行时。它考虑到了如绕射波和首波等多种波的影响，可以减少计算时间并能提高计算精度。

通过上述方法，他们得到了高分辨率的 P 波和 S 波的层析图，并且清楚地显示出油藏的

图形,值得一提的是,礁体的 S 波速度比周围的介质速度低 20%

## 垂直地震剖面

利用 VSP 进行各向异性的研究

同常规的地震反射法比较, VSP 由于能获得直接穿过要调查岩体的地震波,因此可以用来估计地震波速度的变化、波的吸收和地震的各向异性。同时, VSP 的观测系统使该方法对这些因素较常规的地震反射法更敏感。

西方阿特拉斯测井服务公司在澳大利亚 New South Wales 的 Appin Colliery 进行的 VSP 试验勘探证实了这一点。炮点沿着以前的地震测线激发,检波器置于井孔内,得到了很好的资料,并对 Bulli 煤层进行了成像,发现了各向异性的存在。因此他们建议在整个地震勘探战略中将 VSP 作为一种重要的补充手段。

## 利用环绕 VSP 进行 AVA 分析

BGS 的几名成员进行了一个很有意思的尝试,他们利用环绕 VSP 所获得的 P 波信息进行 AVA 分析,以获得裂隙信息。通常与各向异性有关的裂隙观测都是利用横波的资料通过双折射或横波分裂等现象获得的。但与 P 波相比, S 波的勘探要求另外的观测仪器、严格的野外采集以及更高水平的记录和特殊的处理过程。因此最近几年已有人提到利用纵波的反射系数随方位角的变化可发现与各向异性有关系的裂隙分布情况。

在这篇文章中他们所提的 AVA 是指在透射 VSP 勘探中振幅随 P 波到达的方位角变化,即多个炮点以常数的炮检距分布在以常数深度固定的检波器的周围。它与常规的 AVA 不同之处在于,它关心的是透射响应,而不是反射响应。

通过对 6 个环绕 VSP 结果的处理分析,发现在其中记录到的透射 P 波到达的振幅随方位角有很大的变化。而且已经证明它与 VSP 观测环境本身所带来的采集假象是没有关系的。这对利用 P 波进行裂隙预测非常重要,通常认为振幅的变化是由于反射系数随方位角的变化引起的,而实际上可能取决于在不同方位上透射和反射响应的共同作用。他们同时也提到,由于受 AVA 机制和野外数据不足的限制,需要使用环绕 VSP 和地面地震相结合的方法来作进一步的实验。

## 伪 VSP

该文提出的伪 VSP 方法是将 3D 炮记录  $(x, y, z_0, t)$  转换成伪 VSP 数据集  $(x_0, y_0, z, t)$ ,也就是说将地面测到的地震数据转换成地下测到的数据。将地面上的总波场分解成上行波和下行波。其方法是该波场分别插值到每个深度,按预定的井孔/检波器排列进行波场的提取  $(x_0, y_0, z)$ ,其中  $x_0, y_0$  为所设计的井孔深度  $z$  的函数。3D 波场插值算法是按下行波场正插值和上行波场逆插值。其目的是去掉传播的影响和改进地震数据的可解释性。通过将伪 VSP 记录、VSP 模型和 3D 偏移数据体  $(x, y, z)$  的切片综合进行比较,能产生更好的观测显示并能了解波传播情况以及地下复杂地质模型的各种同相轴的起源。最后显示 3D 瞬时波场图,可展示不同时刻的波传播,以改进数据的解释。

## 结论

井中地震比起地面地震有许多优点。首先,井中地震观测比地面地震观测更靠近目的区,而且它通常不会受到风化层的强衰减作用的影响,因此可以利用高得多的频率成分,大大提高分辨能力。此外,在开发阶段,井间地震可以避地面噪音的影响。因此人们希望运用井间观测方法估算两井间的声波速度,能获得比地面地震资料更高的分辨率,并利用这些声波速度(横波和纵波)来确定提高采收率作业中的蒸汽位置及井间砂岩和泥岩层的连续性。但在



实用化过程中却受到很大的阻碍。首先是井下的采集设备成本高,技术不过关;其次是由于需进行井下作业,成本太高。第三是地层一般是水平的,至使井间观测是在临界入射的情形下进行的,从而增加了资料处理的难度。但从今年 SEG 年会中可以看出,随着近年来国际勘探活动的日益活跃和开发地震时代的到来,井中地震的研究又逐渐活跃起来。特别表现在井下采集系统的突出进展上,其必将极大地推动井间地震的发展。另外,VSP 的应用领域正在不断扩大,应成为石油勘探中的重要补充手段。这里值得一提的是,随着水平井数量的增加,在水平井中进行地震勘探正成为现实。

## 有关非地震勘探论文的简单介绍

王小牧

在本届年会上,有关非地震勘探的论文一共占了七个专题,共 56 篇文章。如果分类的话,电磁方法 4 个专题,33 篇论文,其中张贴论文 17 篇;有关重力与磁力勘探的 3 个专题,23 篇论文,其中张贴论文 7 篇。与往届年会的情况相比,论文数量较多,但内容上没有突出的进展。

在有关重磁勘探的论文中,涉及数据处理的方法、技术占了多数,而对油气勘探、开发有开拓性的应用技术和新思路的不多。在仅有的几篇中,美国得克萨斯大学达拉斯分校的 Jennifer L. Hare 等人在阿拉斯加油田 Prudhoe 海湾油藏运用 4 维微重力模拟和反演进行水体流动监测的试验工作是比较令人感兴趣的,在这里作重点介绍。

Brady 等人于 1993 年提出了用高精度重力测量方法监测阿拉斯加 Prudhoe 海湾油藏中气顶注水状态的构想。于是采用了 4 维微伽级高精度重力来描述油藏中地下水和天然气运动状况。以油藏模拟为基础的重力正演结果显示在油藏中注水 5 年后,可在地表产生大约  $100\mu\text{Gal}$  的重力异常,而注水 15 年后产生的重力异常可达  $250\mu\text{Gal}$ 。要达到这样精度的 4 维重力观测,只有借助于高精度的全球卫星定位系统和在记录时具有压制噪声功能的微伽级重力仪才有可能实现。为了尽量减少试验误差,每年进行观测的外部条件和参数必须尽可能地完全一致。有意义的重力信息是经过仪器漂移,潮汐和高程校正后的重力值。当采取各种必要的措施后,4 维重力观测的精度可以达到  $5\sim 10\mu\text{Gal}$ 。这一演算的结果表明,对于不同时间观测的重力资料进行反演,可以获得油藏气顶注水后密度发生变化的信息。为了证实这一方法的可行性和验证 4 维重力观测可以达到的精度,论文作者于 1994 年 3 月在横跨 Prudhoe 海湾的陆上和冰上布设了重力观测站,用 GPS 接收器和超高精度的 L-RG 型重力仪进行了多次重复观测。结果表明,在天气良好时,高程的重复观测精度达到正负 1cm,重力值的重复观测精度为  $5\sim 10\mu\text{Gal}$ 。1997 年 3 月,在野外做了第二次观测试验,试验的目的是为了证实观测点定位的准确性和验证最新的 GPS 定位技术及重力测量技术,从而检测 4 维重力观测监测油藏气顶注水情况的效果。目前,对所测得的数据的分析过程尚未完成。但作者在结论中认为 4 维重力观测技术对监控油藏中地下水体的运动是一项有前途的和经济的手段,认为野外试验证明观测设备和技术都是可行的。

在与油气勘探应用技术有关的论文中引人注意的还有两篇,一篇是加拿大 McMaster 大

学的 G. E. Lebalnc 等人的“利用 Alberta 南部地区高精度航磁数据直接检测油气苗的可能性”一文。作者对 Alberta 南部的 Cypress Hills 地区的高精度航磁异常进行分离后获得了四类不同的磁异常。第一类是基底引起的磁异常；第二类是伴随着岩脉的高幅度、高频线性磁异常；第三类是一些可以被解释成由地表起伏和地形因素引起的低幅度、高频曲线型异常；第四类是钻井井头及套管引起的点状高幅度高频异常。要得出低幅度的高频信息可能与油苗相关的结论需要排除由于井头及套管引起的异常部分。作者的结论是初步的，调查结果表明：局部的磁力低或磁力高与断层的出现及已知的油藏在空间上存在着相关关系。另一篇论文是美国皮尔逊技术公司的 Willian C. Pearson 的“利用磁测方法确定断层的新的成像技术——美国北达科他洲 Willison 盆地红河 B 组走向研究”。作者声称通过对磁测数据所包含的新的属性的计算和运用一种被称为“全矢量彩色成像”的新的图像显示技术，可以确定过去的彩色图件上难以确定的细小断层的走向。采用这一技术，可使两条或两条以上的断层或线性走向在交织并重叠时其不连续性在图上作为细微的色彩间断清楚地显示出来。这一技术在美国 Willison 盆地的运用使得许多细小的基底断层得到清楚的显示，从而帮助了地震工作部署和开发井的布设。

在有关重磁资料处理方法、技术的论文中，小波变换是一个热门课题。其中比较有代表性的是英国哥伦比亚大学李耀国等人的题为“利用小波变换对大规模磁测数据进行快速反演”一文。他们利用小波变换对大规模磁测数据进行反演以计算三维磁化率的分布状态。通过对小波系数设置界限，运用快速小波变换计算灵敏度矩阵的表达式。再通过在小波域中进行稀疏矩阵向量乘法，用压缩矩阵进行快速正演模拟，所节省的计算机 CPU 时间与矩阵的压缩成正比。此外，他们还采用带有共轭梯度算子的对数障碍法来求取反演结果。这种综合求解的方法直接将正演节省的时间转变为提高反演的速度，从而成为一种更为有效的三维磁测数据反演算法。这种算法使人们可以在中型的工作站上对具有数十万个网格点的磁测数据进行反演运算。另一篇有关小波变换用于重磁数据处理的论文是由美国阿科公司的 David A Chapin 提供的。他利用小波变换将两个相邻的重力源产生的由于干涉而用传统的滤波方法无法区分的异常成功地分离开来。作者认为，采用一种小波变换就可将存在于原始资料中最小波长的信息分辨出来。小波变换具有介于频率域和空间域之间的特点，因此它具有独特的性质。但是，小波变换对噪声十分敏感，这是应用中必须注意的。

在其他有关重磁资料处理方法的论文中，有巴西的 Rio Grande do Norte 联邦大学的 Barbosa 等人提出的“用深度等式约束条件稳定重力数据反演基底起伏深度”一文。通常用重力数据反演计算两种均匀介质起伏界面深度的过程是一个病态反演过程，它的解是不稳定的。作者对深度做了等式约束，使这一反演成为一稳定过程。理论模型计算证明该方法是成功的。对巴西 Reconcavo 盆地重力资料进行的反演表明该方法获得的结果较过去重力解释的结果对基底的描绘更加清晰。这种方法可能是一种可用于石油勘探前期工作的有效方法。

阿根廷的 De Fisica Rosario 研究所的 Fernando Guspi 等人提出了一种对位场数据进行网格化和进行分离的稀疏频谱技术。该法采用快速离散傅氏变换获得一个稀疏频谱分布，并由此将位场资料延拓至三维空间，同时分离出区域分量和剩余分量。在运算过程中采用迭代技术改进了它的收敛性。通过实际资料处理，效果良好。

另外，美国 LCT 公司的 J. D. Mac Queen 作了有关起伏地表条件下航空重力测量结果的报告，论述了起伏地表引起的航空重力误差问题。他们研究的结果说明起伏地表可以引起高达 10mGal 的重力测线闭合差。尽管可以采用滤波等手段减小这一误差，但在地形起伏较大

的情况下, 1mGal 的误差难以避免。更好的减少地表起伏引起的误差的方法还在研究之中。

关于电法及电磁法勘探的内容, 以基础理论和数据处理方法居多, 而且大都涉及浅层固体矿藏勘探及工程物探、环境保护等方面, 与油气勘探有关的不多。比较令人感兴趣的是美国、日本的地球物理学家合作在日本的 Awaji 岛上的 Nojima 活动断裂带上以地热资源为目标开展的电磁法测量而发表的一组论文, 他们在该区采用了时域电磁测深法 (TDEM) 及垂向电磁剖面法 (VEMP) 等方法。美国犹地大学的 Efthimios Tataras 等人采用了 S 反演法对 Nojima 断层的 TDEM 数据快速成像。这是一种以薄板模型的电导率为基础的方法, 可用于测定地电剖面的垂直电导率分布。作者的结论认为快速成像的效果良好。该大学的 Michael S. zhdanov 和 Li Weidong 等人对同一数据进行了有限差分偏移成像。他们采用数学模型的方法证明了有限差分偏移法比积分法的分辨率高, 而且其电导率成像更稳定。对 Nojima 断层的二维 TDEM 数据成像的结果也证明了该法的效果较积分法好。日本地热能研究及发展有限公司的 Yasuo Miura 等人开展了垂向电磁剖面法 (VEMP) 试验。他们用数字化正演模型的方法证实了该方法的原理, 并用以探测地下深处的电阻率结构, 由此而判断地热资源的分布状况。作者宣称这是该方法的首次野外设计和试验。利用该法获得了稳定的数据, 经对比, 与初始模型的数据一致。起始值对地下电阻率结构的变化相当敏感。

在有关电磁勘探数据处理方法的论文中, 美国西方阿特拉斯测井服务公司的 P. P. de Lugao 等人的“三维地下构造的大地电磁数据的二维反演方法”是一种较有实用前景的方法。截至目前为止, 大地电磁法及其派生的一些方法, 如声频电磁法 (AMT) 及可控源电磁法 (CSAMT) 的数据都是用二维, 甚至一维的手段进行处理解释的。本文作者通过数学模型的正演和反演, 得出二维和三维结构的高阻目的层的横向电性响应 (TE) 比它们的横向磁性响应 (TM) 更为相似, 而二维与三维结构的高导目的层的 TM 比它们的 TE 更为相似的结论。作者提出, 利用上述特征, 针对高阻目的层或高导目的层分别采用其 TE 曲线或 TM 曲线进行二维反演, 可以替代三维反演, 求取场源体参数用于解释。

此外, 一些论文所涉及的电磁勘探新方法、新技术均因为探测深度的限制难以用于油气勘探, 如我国中南工业大学的何继善院士发表的《采用特殊波形场源的频率域电法》一文中, 将特殊波形场源用于偶频激电法, 频率测深及可控源大地电磁法 (CSAMT), 改善了勘探精度。但其勘探深度最大为 200~400m, 一般只能用于工程及固体矿物勘探。美国麻省理工大学 (MIT) 的石伟群等人将电阻率层析成像用于特立达西印第斯的 Harrison 洞穴成像, 图像清晰, 形态与实际相符较好, 但成像深度只有 30~50m。

## 地震解释论文综述

张振生

SEG 第 67 届年会论文中, 解释研究涉及全球范围, 按不同地区和技术系列分为七个部分, 共 53 篇论文。第一部分: 地震解释技术, 内含十篇论文; 第二部分: CIS 地区, 内含八篇论文; 第三部分: 欧洲、非洲和中东地区, 内含六篇论文; 第四部分: 亚洲、太平洋地区,