

石油物探 新技术系列调研成果

牛毓荃 主编

石油工业出版社

目 录

地震勘探技术的新进展	牛毓荃(1)
国外高分辨率地震采集简介	高章伟(19)
可控震源应用方法	陶知非(34)
可控震源高分辨率地震勘探	李树海(53)
湖泊水网地区地震勘探采集方法	管蕴辉(62)
地震勘探仪器的发展	王百成(69)
仪器监控功能与质量控制	刘万春等(80)
如何为叠前深度偏移建立速度—深度模型	郝顺元(87)
复杂构造的偏移成象	陈炳文(102)
复杂构造成象方法综述	王有新(125)
复杂构造成象技术的新进展	郝顺元(130)
射线旅行时计算的研究与应用现状	王有新(137)
提高信噪比处理的多次波分析技术	刘宝玉(142)
高分辨率地震资料处理技术	郝顺元(157)
地震资料的全三维处理	王有新(180)
三维叠后一步法偏移研究概况	张叔伦(183)
三参量速度分析技术的发展	徐常练(188)
三维静校正	国九英(198)
三维 DMO 研究概况	崔鲜泉等(204)
SEP 和 CWP 成果发布会概况	王有新(207)
三维叠前偏移的现状与发展	王有新(210)
人机联作解释技术的新发展	梅占馨(212)
90 年代人机交互解释发展的现状与趋势	王 强(216)
地球物理油藏描述方法	殷德智等(226)
解释技术综述	金福锦(257)
盆地模拟技术	金福锦(278)
山前带地震资料的解释	牛毓荃(292)
平衡剖面技术与地震资料解释	蒋录全等(323)
老区油气深化勘探技术	赵 君等(336)
井间地震技术	孙忠勤等(352)
井间地震中的导波及其应用	孙忠勤(377)
多分量多偏移距 VSP 与储层裂隙分析	孙忠勤(388)
多波多分量地震技术:数据采集、资料解释和应用	孙忠勤(402)
地面多波、多分量地震技术近几年研究和应用的进展	张礼泉(418)

多波勘探处理技术	朱衍镛(436)
神经网络在地震勘探中的应用	王 倩等(460)
地震资料的模式识别效果初探	林金城(487)
分形技术在石油勘探中的应用	乐友喜等(501)
在地震勘探中有着广泛应用前景的几项新技术	蒋录全(517)
石油物探计算技术与应用软件发展趋向	王宏琳(552)
90年代高性能计算机需做重要抉择	崔学群(564)
数据库管理系统的现状与发展趋势	刘洪树(574)
建立全球油田数据高速公路	崔学群等(581)
俄罗斯地球物理勘探技术	裘慰庭(595)
ИГЭ 处理系统与解释技术发展概况	王宝维(611)
俄罗斯的可控震源地震勘探	李乐天(635)
震电效应在油气勘探中的应用前景	裘慰庭(640)
建场测深在陕甘宁盆地西部地区试验效果	何展翔等(652)
油气勘探中重力新技术方法的进展	韩瑞民(668)

地震勘探技术的新进展

牛毓荃

(石油地球物理勘探局物探地质研究院)

摘要 本文是作者对新技术调研的成果。内容主要包括油气藏地球物理、三维地震技术、地震处理与解释一体化、模型模拟、叠前深度偏移、地震属性、地震仪器、山地逆冲断裂区地震技术等方面。对油气藏地球物理而言,提高分辨率是永恒的课题,因此也将用一定篇幅进行讨论。一些新技术的应用,如井间地震、多分量技术、甚至神经网络等新的教学手段,也在其中作了简评。文末提出了八条建议:

- (1)进一步加强高分辨率地震勘探技术的试验研究工作。
- (2)综合利用地面地震、垂直地震剖面 and 井间地震提高分辨率,进行更精细油藏描述。
- (3)促进解释处理一体化的发展,强调解释与处理人员相结合。
- (4)开展建模技术研究,强调以模型为基础的处理与解释,加速叠前深度偏移技术的发展。
- (5)开展多分量地震勘探技术的研究与实践,着重研究其对碳酸盐岩、各向异性、裂缝分析的应用。
- (6)加速发展三维地震应用,推进三维可视化及全三维解释技术的发展。
- (7)进行山地逆冲断裂区及盐下构造地震勘探技术的研究。
- (8)在油藏地球物理中探讨综合组工作(team work)方式。

引言

1993年石油地球物理勘探情报协作组第9次工作会议决定,各协作组成员同心协力开展一次大型调研活动,为“九五”计划的制定与实施提供有意义的信息。这一工作得到了中国石油天然气总公司科技局、勘探局、物探局以及协作组各成员单位的大力支持,目前各调研课题工作已经完成。本文是对这次调研报告的概括,但并未包含全部内容,详细内容可参阅本书中各个专题报告。

地震勘探技术的发展十分迅速,在这次调研过程中仍不断有新成果出现,很难一一收录在报告中,因此只好在这篇最后完成的总报告中作些一鳞半爪的反映,其不够成熟是肯定的。

归纳起来,近年来物探技术的发展,实际上主要集中在两个方面。其一是油藏地球物理;其二是复杂构造,特别是盐下构造与山地逆冲断裂构造的勘探。

油藏地球物理之所以成为主要方向,完全是石油生产发展的要求。美国经济地质局(Fisher, 1988)指出:

“通过钻加密井、扩边井以及重新完井,美国(不包括阿拉斯加)现在陆上储量可以增加石油 800 亿 bbl, 天然气 $180 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 。另外,利用先进技术提高采收率,估计还可增加石油储量 280 亿 bbl。”

斯坦福大学的 Amos Nur(1994)的意见是:“现有石油开采方法把 70%~90% 的石油留在了地下。”

Mobil 公司(Raff Al-Huseini)的资料则认为:“在美国有效采收率提高 10%,相当于把现有可采储量翻一番,等于又发现了相当于美国已发现油田总数的新油田。”

上述虽然都是估计数字,但已充分说明了油田开发管理的重要意义。油藏地球物理正是应其需要而不断开拓前进的。

自埃克森公司和菲利浦公司在墨西哥湾盐下构造获得工业油气流之后,兴起了盐下勘探热。而且最近在南美、意大利、巴布亚新几内亚的山地逆冲断裂区不断有新的发现,由 15 家国际石油公司于 1992 年形成的“国际地球物理作业协调委员会”(IGOCC)已经设定了“逆冲断层区地震资料增强工程”。其第二阶段工作的详细情况已于 1994 年 10 月 27 日在 SEG 洛杉矶国际年会上展示。由于叠加和时间偏移的理论假设不再成立,用普通方法不能使盐下和逆冲断层下的构造成象,且数据采集和解释工作均有难度。因此发展相应的地震勘探技术是生产的急需。

对于我国“稳定东部,发展西部”的方针来说,上述油藏地球物理及复杂构造区勘探技术的发展方向是极其切题的,也应当是我国物探技术的发展方向。因此本文虽分了几个题目,实际上却都是围绕这两个问题展开的。

油气藏地球物理

油气藏地球物理(reservoir geophysics),有人也称之为油储地球物理,是开发地震、开发地球物理的延伸。

总的来讲,油藏地球物理的任务是运用地球物理方法,如三维地震、四维地震、VSP、井间地震等建立油藏模型,详细描述油藏(储层)结构的非均匀性和流体流动的状态、方式,以及鉴别出当前开发方案中没有进行开采的储量或未最优开采的储量。当然,在油田管理的各个阶段中,其任务和方法也有所不同。下面我们将就油藏管理四阶段、以及与建立油藏模型有关的方法、提高地震资料分辨率等逐一阐述。

油田管理四阶段

油田管理四阶段是:开发前阶段;初始开发阶段;作业阶段和强化采油阶段。

1. 开发前阶段

这一阶段的目的是通过圈定(delineation)油藏轮廓获得最大储量,尽可能减少钻井风险。

其任务是描述圈闭特征,确定其构造性质与范围,确定流体流动的边界和体积,从而确定油藏范围、厚度分布模式以及油气聚集的横向与垂向范围。有些情况下也要确定驱动机制,圈定水层延伸范围。

其主要地球物理方法是三维地震及非零井源距 VSP。

2. 初始开发阶段

主要目的是设计生产井位,获得最大采收率。

任务是描述(description, characterization)油藏和水层。估计岩性及孔隙度在空间上的变化,评价储层的非均匀性,确定有无渗透率障碍,确定油藏中各单元是否连续,尽可能详细地划定流体接触面,分析储层中的裂缝等。根据这些资料构成完整的油藏地质模型。以模型为基础进行油藏模拟,指导制定钻井策略。

这一阶段的地球物理方法应当以高分辨率三维地震为主,辅以 VSP 资料,可能的话也可

采用井间地震。主要是利用提取出的地震属性(特别是波阻抗)与井资料结合建立油藏模型。同时尽可能获得高的分辨率。

3. 作业阶段

这一阶段的目的是进行有效的油田管理,减少作业费用,保证最大油气产量,根据详细的油藏模型打加密井。

任务是确定油藏实际动态与预测动态的差异,用来修改油藏地质模型。测定渗透率障碍,估计储层的连续性,确定波及效率(sweep efficiency)。

在这一阶段应根据井资料、工程资料进一步修改和精心解释三维地震资料。此外,井间地震技术的发展可能会起重要作用。

4. 强化采油(EOR)阶段

强化采油过程中,油藏监视是评价 EOR 效率的关键。实时确定蒸汽、火烧或 CO_2 前缘,可帮助控制或修改 EOR 过程,从而减少作业费用。

EOR 失败的最常见原因是储层的不均匀性和各向异性。因而详细的储层描述是 EOR 之前的关键。

三维地震和井间地震可在 EOR 之前为其设计提供依据,也可监视 EOR 过程。

归纳起来,油藏地球物理有两大技术问题:

- (1)早期精确描述油藏的体积、流体性质、岩性及连续性;
- (2)改进油藏监控技术,保证精确监视和有效管理正在开发的油藏。

解决这两个问题必须将常规工程资料,如岩心分析、测井曲线和采油史等与高分辨地震资料综合应用。

地震作油藏描述的真正障碍仍然是技术,提高地震资料的分辨率应当是我们的永恒目标。
建立油藏模型的方法

油藏地球物理的核心是建立油藏模型。我们的地球物理解释人员实际上一一直在作这个工作,但是却很可能并未意识到是“建立油藏模型”。

传统的建立油藏模型方法是:

- (1)利用地震资料、现有地质和井资料作构造解释;
- (2)根据地震与井资料作岩性解释;
- (3)对岩性作图。

当前,新的建立储层模型方法则强调充分利用地震属性,如振幅、速度、波阻抗、AVO 效应等(关于地震属性,下面还要专门讨论)。其方法是:

- (1)构造解释,与前同;
- (2)提取地震属性;
- (3)研究井位处的地震属性,利用地震资料与井资料对比地震属性与井中所得储层参数;
- (4)岩性解释,同前;
- (5)对岩性作图,与传统方法不同之处在于,是以地震资料加上井资料为基础的地质统计方法。

我们举一个利用波阻抗建立油藏模型的工作步骤的例子:

- (1)最佳处理地震剖面;
- (2)由一组地质家、岩石物理家、地球物理家共同构成初始波阻抗剖面(可用宽带约束反

演、稀疏脉冲法、常规求取波阻抗方法等)；

(3)通过正演模拟，自动迭代改进初始波阻抗模型，使模拟得到的地震剖面与(1)中之“最佳处理的地震剖面”最佳地拟合，这时认为所得波阻抗模型是正确的；

(4)将所得波阻抗模型转换为岩石物性剖面，在这一阶段可用井中岩石物性测量结果标定模型，可以用各种方法进行转换，如确定性方法，聚类分析，模式识别等。

模型模拟技术对建立油藏模型的应用

模型技术目前渗透至地震勘探方法的各个方面，并成为连接采集、处理 and 解释的纽带，起着日益重要的作用，后文将专用一节来讨论这个问题。现就其对油藏模拟的作用略述如下。

由前述可以看出，一旦建立了油藏模型，就知道了储层及其周围岩石的构造形态，岩性和地震属性。利用正演模拟(射线追踪模拟、波动方程模拟等)可以制作出相应的地震剖面，将其与实测地震剖面比较以修改油藏模型的参数，直到他们之间达到满意的拟合为止。

当然，还可以、而且是常常作局部的模拟。例如：

(1)在产油(气)井与不产油(气)井之间解释出产层厚度、孔隙度(渗透率)等的变化情况，构造出各个解释方案的“地层模型”，据以作出正演合成地震记录，与实测记录比较，确定最佳解释方案。

(2)根据地震及地质钻井资料，确定出油(气)水界面的形态及岩性组合(可以有多种方案)，作出模型，根据模型模拟的结果，确定最佳解释方案。

总之，模型技术是验证和修改解释结果，验证和提高所建立的油藏模型的重要手段。

提高地震勘探资料的分辨率

前面已经谈到，提高地震勘探资料的分辨率是我们永恒的目标。我国著名地球物理专家李庆忠、俞寿朋对提高地震采集和处理的分辨率作出了重要贡献。但是，油藏描述中有重要意义的参数要求用仅 1m 左右的地震波长进行测量，换算成频率则是上千赫兹。对深层油气田而言，这目前尚是一个可望而不可及的目标，需要我们坚持不懈地努力。

我们应当牢牢记住，地震资料的分辨率决定于绝对频带宽度，越宽分辨率越高。当前一个错误的概念、特别是非地震技术人员的错误概念是，频率越高，分辨率越高。10~60Hz 与 950~1000Hz 的频带宽度是一样的，因而分辨率也是一样的，都比 1000~1040Hz 频带的分辨率高。当然，相对频宽决定于波的相位数，也是一个应当考虑的因素。处理上常常要求相对频宽大于 2.5 个倍频程。

然而，我们还应牢牢记住扩展、增强地震资料的高频成分是提高地震资料分辨率的关键。这是因为随着地震波向地下传播高频成分迅速衰减，因此扩大绝对和相对频宽的主要障碍是缺少高频成分。

提高地震勘探的分辨率是一个系统工程(李庆忠)，目前采用了高分辨采集，严格野外施工，提高炮点、检波点测量定位精度，尽可能提高静校正精度，实行高分辨处理等，已经获得了很大提高。

此外，还见到了以下方法。

(1)改进地震勘探仪器。

90 年代出现的新型仪器，如 I/O 系统 II、VISION8000、SN388、ARAM-24 等有如下特点：多道，几种仪器均在 7000 道以上；直接 24 位模数转换，提高高频可记录性；采用 6dB/oct 的高频提升；提高去假频滤波器的截止频率，由 $0.5f_N$ 提高到 $0.7\sim 0.8f_N$ (f_N 是尼奎斯特频

率)。

最近加拿大的 Paquette Projects Limited 公司(Paquette 等, 1995)在其艾伯塔南部的 Shouldice 河道砂油田上进行了 16 位记录仪与 24 位记录仪的比较。结论是 24 位直接记录分辨率较高, 识别点砂坝异常较好。但就其列出的振幅谱来看, 浅层地震频带改进较明显, 深层则改善不大。

高频提升应慎重使用, 尤其应了解各种频率下的信噪比。

最近还使用了高频响应比较好的涡流检波器和加速度检波器。

(2) 采用可控震源非线性扫描, 提高输入地下的高频能量。

最近见到一些用这种方法提高分辨率的例子。但是, 高频能量扫描时间的提高会同时减少低频扫描时间, 两者之间的协调, 以及高频能量的增长方式均需在试验的基础上谨慎确定。

(3) 地面地震与 VSP 或井间地震相结合提高分辨率。

与测井资料相比, 地面地震资料的横向分辨率(横向采样率)远高于测井, 而垂向分辨率远低于测井。

而 VSP、井间地震与地面地震相比, 覆盖面积较小, 介于测井与地面地震之间; 其垂向分辨率也介于测井与地面地震之间。将地震剖面与 VSP 剖面或井间地震拼接起来, 可提高地震解释的分辨率。

多分量地震技术的作用

使用普通震源、三分量检波器接收可得三分量地震记录, 即 3C 地震。用三维观测系统采集三分量地震资料就成为三分量三维地震(3C×3D)。如果用三分量震源激发、三分量检波器接收则形成九分量地震。

前面已经说过 EOR 过程失败的最大可能来源于储层的不均匀性和各向异性。Berkhout 教授曾指出地震勘探扩展到油藏描述, 要实现五个方面的转变, 其中之一就是从各向同性向各向异性转变。这是上游石油工业发展所要求的。普通地震方法不能检测地下各向异性, 只能求助于多分量地震。因此, 科罗拉多矿院的 Davis 博士说: “没有 3C 记录, 3D 地震的全部潜力现在达不到, 将来也达不到”。目前国外已经广泛开展了多分量地震技术的试验研究工作以及 3C×3D 地震的试生产工作, 其采集费用比普通 3D 地震高 1/3。

三分量资料的效用是: 增加用地震资料确定岩性的可靠性, 包括确定隐蔽的成岩作用的变化、裂缝储层以及岩石—流体性质变化的可靠性; 用纵横波速度比估计孔隙度及孔隙度流体成分; 快、慢波时间差确定裂缝长度; 快、慢波偏振方向确定裂缝方位; S 波偏振方向及幅度确定各向异性; 由各向异性导出原地应力的方向及其相对大小以及渗透率和流体导性的估计值。

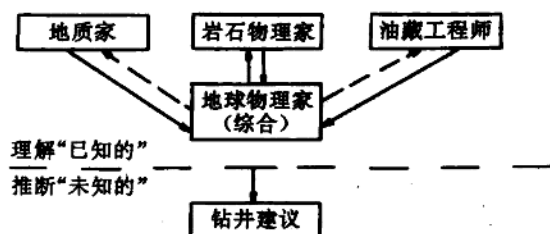
多学科综合研究组

当前西方石油界流行一个词组 team work, 简译是队、组工作, 这个名称不上口, 也未表达其原意, 因此这里称之为(多学科)综合(研究)组工作。

多年来我们一直强调综合解释, 但在开展油藏地球物理工作以来, 综合研究已扩大到不仅包括地质、地球物理, 还包括了岩石物理、油藏模拟、油藏工程和信息系统。这是一种多学科综合研究的趋势, 这种趋势方兴未艾。

最近, CGG 公司地质部的 Bertagne(1995)下了这么一个定义: 综合研究就是利用一切可用的资料描述和预测目的沉积剖面的几何形态、岩石物理特征和流体成分。

综合组中各类专家彼此不断相互交流, Bertagne 设计的交流方式如下图:



一个典型的例子是 RAZOR (Reservoir Analysis Zone One/Romeo) 计划, 这是由 BP 的勘探公司、Exxon 美国公司、Arco 阿拉斯加公司共同构成的多公司的多学科综合研究组, 目的是对下 Ivishak 储层作详细的描述, 帮助进行精细的油藏管理。所有三个公司都为这个组提供了地质、地球物理、岩石物理、油藏模拟、油藏工程和信息系统方面的人员。研究组内下设各学科分组, 各分组每日的交流是计划成功的关键因素。

非常规数学方法的应用

近年来一些非常规数学技术已引入到物探技术中, 并得到了迅速的发展。例如神经网络计算技术、小波变换、模糊数学、分形几何学等。这些技术也已经引起我国物探界的广泛注意, 开展了研究与应用工作, 并取得了一定的进展。

其中神经网络计算技术、小波变换技术、分形几何技术已在我国得到了迅速的发展。一个非常值得重视的趋向是: 神经网络技术与小波分析、模糊数学、模拟退火及遗传算法相结合产生的自适应的小波神经网络、模糊神经网络等, 有可能会成为勘探工作的有效工具。

小波变换目前已用于时变滤波、信号分离、地震成像、提高地震资料分辨率、数据压缩等地震勘探的各个方面, 预计在波场分离、解波动方程、检测薄层、求取地震反射系数、图象、处理方面有广泛应用前景。

我国已把神经网络技术广泛应用于储层预测之中, 1995 年 7 月石油物探东部第七次学术研讨会中, 专门论述和涉及这一技术的论文至少有 9 篇, 占会议论文数的 20%。这一点已大大超过了国外, 1994 年 SEG64 届年会的 466 篇论文中, 仅有 3 篇是有关神经网络的。这是因为国外不少人认为神经网络技术最有希望的应用是地震处理中劳动力密集型任务的自动化, 如道编辑、旅行时拾取和速度分析的自动化。

虽然我国在储层预测上大量使用神经网络分析, 但笔者认为此种方法尚不能认为是已成熟的方法, 需要考虑以下一些问题。

(1) 研究地震属性与储层参数的关系, 有些地震属性可能与目的层本身无关, 而反映了浅层干扰的变化, 若对输入属性不加鉴别, 有些属性只会引起混乱(俞寿朋, 1995);

(2) 研究选择最佳属性的方法, 如俞寿朋(1995)所指出的, 要考虑所选属性的“显著性”、“单解性”以及“充分性”;

(3) 研究训练样本的选择。训练样本和使用的地震属性要有区域代表性。

三维地震在油藏地球物理中的应用

在“80 年代石油物探技术”一文中, 作者在展望 90 年代地震技术时, 曾预言三维地震将逐

步取代二维地震。这一点已为越来越多的人所认识。斯伦贝谢油田服务公司的 E. E. Nestvold (1994) 在“三维地震革命对油田开发的影响”一文中指出:我们深信三维地震技术是未来的关键,最近几年它在确定油田开发和勘探战略中甚至会起更加重要的作用。去年 10 月美国洛杉矶举行的 SEG 65 届年会上,有许多关于用三维地震在老油田(其中一个油田是 1938 年发现的)找到新储量,用三维地震作油藏描述和用三维地震寻找地层圈闭的例子。

Morgan Keegan 投资公司估计三维占整个地震市场(1992 年)的 50%,其年增长率为 40%,未来 5 年三维费用将增加 15 亿美元,预计到本世纪末二维地震将彻底被淘汰。彻底被淘汰或许是言过其实,然而三维取代二的趋势是毋庸置疑的。

据壳牌石油公司 E. O. Nestevold 介绍,该公司 1975 年开始作三维地震,1979 年以来三维勘探费用指数上升,1989~1991 年三维采集面积累计达 60000km^2 ,1992 年一年采集了 40000km^2 。

1993 年西方物探公司透露,该公司在墨西哥湾海域作了 100000km^2 以上的三维地震。

Geco-Prakla 公司统计,1992 年陆上三维采集达 38540km^2 。

1994 年 11 月统计,北美 80 个陆上地震队中 64 个是三维队,37 个海上队中 34 个是三维队,总计三维队占总队数的 84%。

油藏地球物理的需要是三维地震迅速发展的重要原因。

三维地震在油田管理四阶段中的应用

三维地震是油田开发管理中应用的最广泛也是最主要的物探方法,这一点是人所共知,也是人人重视的,现归纳如下:

1. 在油田管理四阶段持续应用

千万不要在开发前阶段或至初始开发阶段应用三维资料之后就将其束之高阁。而是应当建立三维解释数据库,在油田管理的各个阶段不断用油藏工程资料改进现有解释。

2. 用三维地震资料搞清油田的几何结构

包括形成圈闭的地层产状;引导或阻挡流体流动的断层和裂缝模式;构成地层油田的沉积体的形态;搞清任何可能切过油藏的不整合面的取向。

3. 研究岩石和流体性质,建立油藏模型

在井位处建立地震属性与储层参数间的对比关系。地震属性指波阻抗、振幅、层速度(或层间旅行时)、频率、相位变化等(见后文),油藏参数指孔隙度、流体类型、纯产层厚度、岩性等。

根据建立的对比关系加上地震资料,预测储层参数在空间上的分布,建立油藏模型。

根据以后的钻井资料进一步修改、提高所建立的模型。

4. 流体流动监视

利用三维地震资料中地震属性的变化,可以监视开发或注入产生的流体的流动。其基本过程如下:

(1)采集基本三维地震资料;

(2)开发过程中或注入(EOR)产生流体流动,伴随压力温度变化,从而产生地震属性(例如速度)变化;

(3)一段时间后用相同条件再采集地震资料;

(4)观察两次地震资料间地震属性的变化。

证明地震属性变化是流体流动或温度、压力变化造成的。

两次采集处理的资料之间的差异主要表现在储层,储层以上的地层不应当有变化,如有则应校正。

当然还可以进行第三次采集。

这种不同时间采集三维资料的方法,也称为四维地震。

三维新技术

1. 三维可视化为三维地震技术插上了翅膀

三维可视化实质上是在计算机的二维屏幕上显示出三维图象的方法。计算机的屏幕是二维平面,其上显示的图形就像是照片,也是二维的,也就是说在屏幕上只能从某一个角度观察三维物体,这样常会丢失细节,而且也可能导向错误的理解。因此,在三维屏幕上观察三维图象的唯一方法就是加上运动。这样作计算工作量大为增加,构成1兆字节的三维模型并且每秒钟将其旋转30次,比在屏幕上绘制同样字节的二维图象,计算工作量要多20万倍。尽管如此,当前的计算机技术已实现了这一点。而且,直观的、人机联作式三维可视化技术正日渐与三维地震处理和解释融为一体,既用于质量控制,也用于数据分析。

可视化的三维地震数据体和地震属性,可以为地球物理工作者提供完整的三维数据表示和访问数据的方法,从而直接影响数据处理和解释的决策。人机联作三维计算机图示可以产生透明的、实的三维体、平面和线条。这些图象可用来表示一个测区所有的亿万地震和地质信息,并且可以用任何方式确定位置、旋转、拉伸,以帮助分析这些信息。存在数据库中的测区的各种地震属性可以显示成等值曲面并与其他属性同时观察以确定他们的内在关系。例如了解异常体的三维形态和细节,确定断层的连接方式等。

例如,Mobil公司曾在一个正在开采的油田上作了大量三维地震工作,并用普通地震解释工作站作了解释,定了井位,后来用CSD公司的Voxel Geo软件,Mobil的解释员认识到若干口井并不像原来深信的那样定在排出可采储量的地方。由于可视化能从不同角度观察,突出了各个异常,他们还发现,推荐的井位并没有与其余的未测试异常相交在最佳的位置。该公司因而改变了井位,重新评价了原来以为无经济价值的层位。可视化技术使Mobil公司对复杂油田作了更高质量的解释,更有效地开采现有储量。

另一个例子取自GeoQuest公司,该公司有一套墨西哥湾的资料,用作培训教材已有三年,这套资料上有很多断层且构造复杂。许多石油公司的地球物理学家用这套教材培训公司人员时,都解释过这套资料,其中没有一个解释能完全阐明这套资料中的断层组合模式。1992年,通过使用该公司的新的可视化软件产品GeoViz,解释员们对这套资料有了全新的理解。他们完全了解了三年来他们所不懂的这套数据的性质和复杂的断裂模式。

总之,三维可视化使我们可以同时从各个角度观察三维地震数据体,而不是只从一个角度观察(二维图形),三维现象有了三维表示,这无疑为三维地震插上了翅膀。这是真正的突破。

2. 三维相干性数据体(3D coherence cube)

这是一种计算三维数据体中各道与其相邻道的相干性得到的数据体。计算中使用的道数可以是3道、5道、9道,甚至更多。

由于断层、河道、盐丘边界等地质异常体两侧的相干性较小,因此在相干数据体的切片上,这些异常,尤其是断层显示得比普通切片清晰得多。特别是那些平行走向的断层,在普通切片上基本看不到,而在相干性数据体的切片上却很清楚。

1995年这种方法问世,立刻产生了巨大的反响。Amoco公司申请了国家专利,组成了

CTC(Coherence Technology Company),专门开展这项业务,加拿大已有公司代理这项业务。

地震处理与解释的重新结合

大约由 1956 年开始,出现了地震资料的数据处理(随后是数字记录),这使地震勘探技术分裂成了三个分支学科,即采集、处理和解释,分别由不同的分支机构完成。

长期以来,地球物理学家已认识到这种被迫分裂有许多缺陷。例如解释与处理分家,交到解释员手上的是经过处理的剖面,虽然提高了信噪比,有比以往更高的可解释性,但是也压缩了数据。这种压缩并不总是合理的,被去除的数据中,有一些实际上可能含有岩性、孔隙度、流体成分、构造以及地层学的信息。处理的问题在于提高信噪比的同时,究竟要保留多少原始资料,以何种形式保留他们,才能为解释员提供可能是最好的地下图象。另外,在地震资料处理中还常常作许多物理和数学(甚至是美学)的假设,因而在地震解释人员拿到剖面之前就会改变地震资料的特征及其空间位置。要想避免这种无心丢掉适合于解决地质问题的信息现象,就要尽可能地利用解释知识指导地震处理。然而,在处理和解释相互分开的时代,这几乎是不可能的。因为处理人员和解释人员之间,既有知识上的差别,也有地理上(常常不在一处)和时间上的距离。或许最严重的是时间上的距离,当解释人员把地震资料重新送回处理中心,作某些改进时,耗费的时日通常都是以周或月计。这不仅造成时间浪费,甚至会打断解释人员的思路,造成严重的损失。

地球物理学家一直在寻求解决这类问题的办法。这种努力的结果首先是解释工作的现代化。80 年代初期出现了人机联作解释工作站,解释人员利用工作站进行三维和二维解释;随后,80 年代末期又出现了人机联作处理。勘探开发(E&P)工作站的高速高质量算法为地震资料解释与处理的重新结合奠定了基础。人机联作解释和处理已可分别在单独的强有力的工作站中完成,但这仍不是两者完全的结合,只有在网络计算环境中,建立起人机联作解释软件和人机联作处理软件共用同一个软件平台,形成两者之间完全无缝的连接之时,两者的重新结合才算完成。这种重新结合也就是我们所说的处理、解释一体化。

1991 年兰德马克公司发表的白皮书,认为解释与处理相结合的体现是解释性处理:

解释性处理 = 人机联作处理 + 迭代地质模拟(在集成环境中)

有了解释性处理,解释员就可以迅速了解地震处理的各个方面,对地震处理进行以往想像不到的控制。解释员与处理员协同工作,可由地震资料提取更多的地质信息,用以作出更准确的地质模型。其结果就是能更好地识别出隐蔽油储,并把钻井风险和费用减小到最低限度。

目前兰德马克、西方地球物理和 CSD 等公司均已有了这样的工作站。

模型技术渗透到地震技术的各个方面

模型为基础的采集设计,模型为基础的处理、模型为基础的解释,使模型成为地震勘探技术各环节的纽带。

模型为基础的采集设计已经很普遍了,石油地球物理勘探局地调二处也已编出了实用软件,这里不再赘述。下面我们阐述模型为基础的处理和模型为基础的解释。

模型为基础的处理

俞寿朋在评述 1995 年 SEG65 届年会的学术活动时,曾指出地震处理已进入新时代,模型为基础的时代、深度域时代、下个世纪则可能是模糊模型的时代(根据 SEG 技术发展委员会)。

模型为基础的处理与以往处理的不同之处如表 1 所示:

表 1

	普通处理	模型为基础处理
目的	估计地下模型	估计地下模型
取得的模型	时间模型	深度模型
方法	时间偏移	深度偏移
所用速度	平滑速度场	详细速深模型
射线概念	直射射线	按斯奈尔定理折曲
工作方式	相对独立	与解释相结合

目前,以 Paradigm 公司为代表的许多地球物理公司都推出了这种以模型为基础的处理。我国不少单位也在进行这方面的工作。需要提醒的是,一定要强调“模型为基础”。只有这样才能把处理与解释融为一体。

模型为基础的解释

前面我们已经看到,处理和解释相结合是当前发展的趋势,结合的代表就是解释性处理,也就是人机联作处理加上迭代地质模型模拟。G. S. Edwards (Texaco Geophysical Research Facilities) 这样形容解释技术的变化:“以后几年中,解释技术将变得更加科学,解释员将把他们的技巧由使用彩色铅笔和纸剖面对比转向使用人机联作工作站,其中数字地球模型模拟将成为规范。人们形容对作模型知其然而不知其所以然的不高明解释员时,常说这个解释员作模型的目的只是为了回答老板提的问题(作模型了吗?)。由此可见老板对模型是如何地重视了。

解释用的地震模型有两种,即地层模型和构造模型。一般来说,地层模型求解的是地层、岩性、油气水界面的问题,是比较精细的时间模型,而构造模型求解的是地质构造,主要是复杂构造问题,是比较宏观的深度模型。他们的主要不同处见表 2:

表 2

	构造模拟	地层模拟
地震现象	射线弯曲	干涉效应
地震属性	到达时间	振幅
处理	偏移及叠加速度	波形估计,反褶积及增益控制
模型参数	构造及层速度	层厚和波阻抗
模型大小	由地面到目的层,宽到保证得到来自任何目标的射线	目的层上、下不大的范围,宽度即目标的宽度
地层单元	厚层	薄层,薄到可解释干涉现象
3D 效应	重要	不重要
模型类型	深度	时间

以模型为基础的解释已成为当前解释工作的最重要的一部分。我国物探界在近几年来对地层模型比较重视,在进行储层预测、油藏描述工作时,常常作一些模型。当然尚有一些不足之

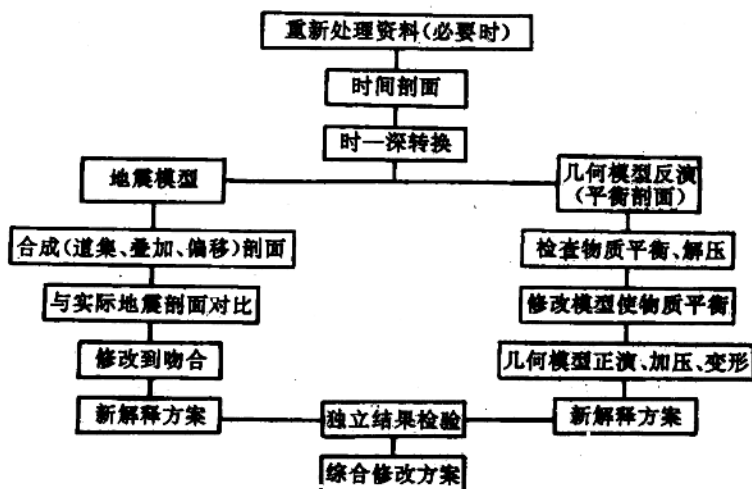
处。但对构造模型却有些忽视,近来由于西部复杂构造区的解释,模型模拟开始有人注意了。

复杂地质构造区地震资料的解释是离不开模型模拟的,可以说山地逆冲断裂区中地震资料质量不太好的地方,其解释是典型的以模型为基础的解释,而且是地震模型模拟与几何模型模拟相结合的解释。所谓几何模拟,其正演就是由原始水平状态的沉积层出发模拟其构造变形状态,其反演就是构造变形的复原(其二维形式常被称为平衡剖面)。地震反演模拟和几何反演模拟均有多解性。两者相结合可以把多解性减至最低。

几何模拟实质上是按照假设的物质平衡条件(层长守恒、面积守恒、体积守恒)度量褶皱及断层的空间要素并检查其内部的一致性,从而检查原来解释的一致性。

地震模拟则度量射线通过复杂构造的速度场时弯(折)曲造成的影响,道集模型模拟检查 NMO 校正的正确性,识别偏移后未得到压制的绕射。叠加剖面模拟可检查剖面解释的正确性,检查有否侧面反射,特别是检查速度上拉(或下陷)的影响。当然也可做偏移剖面模拟。目前三维地震模拟软件也比比皆是。

两种模型相结合的一种简单流程如下:



SEG/EAEG 三维建模委员会的工作

勘探地球物理学家协会(SEG)和欧洲勘探地球物理学家协会(EAEG)都非常重视模型工作。1990年EAEG专题讨论会上发表的二维Marmousi模型曾发挥过重要作用,我国石油地球物理勘探局等单位在研究三维叠前深度偏移时也使用过这个模型。

1992年末SEG/EAEG 3D建模委员会成立,并开展3D SEG/EAEG建模工程(SEM)工作。目的是建立盐丘和逆冲断层的三维模型,并根据这些模型模拟实际三维地震测量的结果。

这个建模委员会的第一次进展报告刊载于TLE,1994,Vol. 13, No. 2上,第二次修改结果刊载于TLE,1994,Vol. 13, No. 9上,而第三次修改报告载于TLE,1995,Vol. 14, No. 2上,最近一次改进则刊载于TLE,1996,Vol. 15, No. 2上。

目前已有许多组织和个人开始使用SEG的模型,例如:用逆冲断层模型的炮道集检验Delft大学关于生成虚拟VSP剖面的新概念;作为墨西哥湾盐下地震成像工程(CRADA LA94C1051)的一部分,用SEMD(SEM数据集)进行爆炸反射面模型模拟;雪夫隆的Ray Er-

gas 用盐丘模型的炮道集检验他的公司的数据压缩技术等。

大学、美国的国立实验室及石油天然气界已于 1995 年春开始合作研究利用和提高 SEMD 数据集工程,并命名为用 SEMD 检验三维地震分析的先进计算工具,并通称之为 ACTI/SEG。

已有许多公司参加了这一工程,他们仍然欢迎其他公司参加这一工程的各个部分。

综上所述,可知模型模拟技术已深入到地震勘探的各个环节,成为他们的纽带。我国虽然在地层解释中偶然使用地层模型,但总的来说构造模型用得很少,更谈不上把模型放在较高的位置上,各种工作站的处理软件中,模型软件的利用也很低。我们必须对这项技术给予充分的认识,迎头赶上世界水平。

叠前深度偏移技术迅速发展

近几年叠前深度偏移技术的发展势头非常强劲,许多地球物理公司都推出了自己的软件。其中 PARADIGM 的宣传尤甚,他们的宣传品上有一句话,叫做“是在深度域思考问题的时候了”(It's time to think in depth)。在 1988 年中国石油天然气总公司数据处理会议上笔者曾指出,在地震资料处理中使用时间剖面的历史已太长了,是使用深度剖面的时候了。的确,无论是叠加剖面或时间偏移剖面,其上都有许多与地震波传播速度有关的假象。由于速度异常的影响,时间高点在深度剖面上可能根本不存在,甚至地质层位的倾向也可能因为速度而与实际不符。这为地质解释人员带来巨大的困难。最重要的一点是,对于逆冲构造、盐下构造之类的复杂构造,由于地震射线按斯奈尔定理折曲,反射时距曲线已非双曲线,叠后偏移在理论上(实际也如此)就不能使其正确成象,当然也谈不上正确解释。

对复杂构造必须进行叠前深度偏移,这在地球物理界早已形成共识。然而,十多年来一直停留在对个别二维测线做试验而已。其主要原因是两个:一是计算量大、成本高、速度慢;二是叠前偏移对宏观速度模型有强烈的依赖性,而求取速度模型的方法一直在研究之中。

1992 年以来叠前深度偏移技术发展很快,特别是埃克森公司和菲利普公司在墨西哥湾盐下构造获得工业油气流之后,美国兴起了盐下勘探热。然而盐下构造在时间偏移剖面上是看不清楚的,必须使用叠前深度偏移。也就是说生产的需要推动了这种方法的发展。

除了生产需要以外,也有了进行叠前偏移处理的可能。首先是近年来计算机技术发展迅速,包括运算速度愈来愈快,内存容量愈来愈大,性能价格比不断改善,尤其是并行机的出现,大大提高了叠前偏移的处理效率,成本降低,已可为工业界接受;其次,求取宏观速度模型的方法日趋成熟,如深度聚焦分析法已有十年的发展史。目前最有前途的、为不少地球物理公司采用的方法,是通过叠后深度偏移和层析反演结合,利用工作站的可视化显示建立三维速度—深度模型的方法;如 PARADIGM 地球物理公司的以模型为基础的深度道集速度分析方法。

对叠前深度偏移技术需指出两点。其一,必须精心消除多次波的压制。因为偏移本身不考虑多次波的压制,对叠后偏移这不是个大问题,因为叠加已消除了大部分多次波。而叠前偏移则无此优越性。其二,叠前深度偏移是典型的基于模型的处理,在其整个处理过程中,都存在建立和修改速度模型的问题。这种修改不仅牵涉到算法,而且牵涉到资料的解释及对地质情况的了解。因此必须有解释人员介入,也就是处理与解释相结合。

目前,我国西部地区复杂构造和盐下构造的成象问题已迫在眉睫,如不解决将直接影响勘探水平,这有可能像美国墨西哥湾的盐下勘探一样,促进我国叠前深度偏移技术的发展。

加强地震属性的研究和应用

所谓地震属性就是根据地震记录测量或计算出来的一些参数,如振幅、速度、时间、AVO、波阻抗、频率…等等。过去也有人称为地震参数、地震特征或地震信息,目前 SEG 年会的文章已逐渐统一使用属性(attribute)一词。我们曾经说过 80 年代地震技术发展的标志之一是广泛应用了 3A(三种属性)技术。在本文的第一部分中,我们已经说过,油藏地球物理的核心,一般是在高质量构造解释的基础上,提取地震属性,在井位处建立地震属性与储层参数(如岩性、孔隙度、流体成分、流体饱和度等)的关系,用于进行储层横向预测,建立油藏模型。因此,目前提取的地震属性种类也日渐增多。尤其是许多新技术,如多元统计分析,神经网络反演、模式识别等,使用的地震属性常常多达一、二十种以上。因而地震属性的提取和分析技术有了很大的发展。我们在油藏地球物理部分曾提出要研究地震属性与储层参数之间的关系,以便选择最佳属性。Seismic Research Corporation 公司的 Taner 等(1994)对地震属性作了归纳整理,并将其划分为物理属性和几何属性两类。

物理属性用于岩性及储层特征的解释,本身又可分为两类:

(1)由解析地震道计算出的属性,这是最常用的一些属性。包括:道包络振幅及其一阶和二阶导数。瞬时相位、瞬时频率、瞬时加速度、瞬时 Q 值以及他们沿反射面在一个时窗中的统计量。在地震道包络极大值处计算的瞬时属性称为主(Principal)属性,也有人称为“响应”(Response)属性(Bedine, 1984)。另外还有地震道的频谱特征、相关系数以及他们派生出来的属性。

(2)由叠前资料计算出来的属性,如振幅及其与炮检距的关系、正常时差、纵波及横波层速度、波的到达时间差。

这些属性各自均有一定的解释意义,如:

- ①包络。指示大的岩性变化,不整合面,天然气或其他流体聚集。
- ②包络的导数。指示吸收效应,同相轴的突出程度等。
- ③瞬时相位。表示同相轴连续性,构造和地层的结构。
- ④瞬时频率。表示同相轴的频率特征,吸收和破裂的影响,沉积厚度。
- ⑤瞬时加速度。薄层效应,可能的孔隙度。
- ⑥主频。类似于瞬时频率,是对比的工具。
- ⑦瞬时带宽。吸收效应。
- ⑧瞬时 Q 因子。可直接估计吸收效应,裂缝效应,含气层的影响,可能是渗透率的指示。
- ⑨归一化振幅。波的对比追踪标志,同相轴中断标志,岩性参数。
- ⑩层速度。岩性参数。
- ⑪波阻抗。岩性参数,储层横向预测,油藏描述的主要地震属性。
- ⑫视极性。区分不同类型的亮点,是剖面极性的标志。

几何属性或反射结构,用于地震地层学、层序地层学及断层与构造解释,如旅行时,同相轴倾角,横向相干性(同相性)等。

这些属性提供地震同相轴的几何特征,确定反射层的中断、连续性、曲率、整一、杂乱、不整合、斜交、平行、发散、收敛以及断层等各种特征,用于确定地震相、体系域等。

这里我们应当着重指出的是,地震属性中最重要、最基础的属性是振幅、速度和波阻抗,他们是储层横向预测、油藏描述应用的最重要的属性。

由振幅属性派生出来的 AVO 技术近十年来有了很快的发展。1993 年 SEG 专门出版了《AVO:墨西哥湾沿海的实例研究》(Amplitude Variation with offset; Gulf Coast Case Studies)一书。该书既有 AVO 成功的例子,也有其失败的教训,同时还给出了一些 AVO 研究中难以解释的现象。

最近几年我国地震属性的提取和利用发展很快,既有从叠前也有从叠后道集计算出来的属性,其中一些是从复地震道计算出来的,而且由定性分析变得较为量化。

利用地震属性能显著改进岩石物性特征的空间分布的成图,指导空间内插。在控制井有限时,可提供非常优越的物性图,用于体积计算,地质模拟与油藏模拟。

预计,提取地震属性及其应用的研究仍将进一步发展。

地震勘探仪器的新进展

三维地震技术、高分辨率地震技术对地震勘探仪器的要求是多线多道、高动态范围、高频率,这一直是地震勘探仪器的研制方向。90 年代以来在这三个方面都获得了重要的进展,而以 Western Geophysical Exploration Products 的 VISION 8000 型、INPUT/OUTPUT 公司的 I/O System Two 型、Sercel 公司的 SN388 型、Sourcec seismic 公司的 ARAM-24 型以及适合于复杂地形条件的无线遥测地震仪 Opseis Eagle System 较为突出。

首先我们看看线数和道数的要求,三维地震一般都用线束施工,也就是同时布置多条线放炮,例如 4 线、6 线、8 线...,线数多的优点是同样的工区面积时线间距离可以小,因而分辨率也高。如果每条线都与二维测线一样,则 n 条线的线束就要求仪器的道数是二维测线道数的 n 倍。另外高分辨率地震要求同样的测线长度时,道距比普通测线小,也要求有更多的道数。如果再考虑 $3D \times 3C$,即三维三分量采集,则所需道数还要增加两倍,90 年代以前除了基本上已淘汰的符号位地震仪外,尚未有实际上超过千道的仪器。90 年代出现的新型仪器则多在 1000 道以上。VISION 最多为 7600 道,每条线可达 1024 道,可多达 251 条线,I/O System Two 为 4032 道,每线最多可达 1008 道,最多可用 512 条线。SN 388 号称万道以上,每条线也可达 600 道。这是一种历史性的突破。

仪器的动态范围(同时接收大小信号的能力,或称仪器的信噪比),在 90 年代以前有两次突破性进展:

- (1)由光点记录到模拟磁带记录,动态范围由约 20dB 提高到约 50dB。
- (2)由模拟磁带仪的 50dB 提高到数字地震仪的 84dB(14 位模数转换的理论值)。

上述 90 年代新仪器均采用 $\Sigma\Delta$ 技术,去掉了瞬时浮点增益控制,直接用 24 位模数转换记录,比原来数字地震仪多出 10 位,理论动态范围由 84dB 提高到 144dB,提高了记录强信号的同时记录弱信号的能力,从而提高了分辨率及深层勘探的能力。

1995 年加拿大一家公司在河道砂岩体异常上方进行了 16 位与 24 位数字地震仪的试验对比,所对比的仪器是 I/O System Two、Bison 24000(24 位仪器)和 DFSV。对比结果表明,两种 24 位仪器得到的隐蔽河道异常的图象,都比 16 位仪器聚焦好,更连续、频率也更高。隐蔽的构造披覆和下陷,河道边缘的向下切割、储层的范围都得到更好的确定。然而,就试验获