

油气勘查与储层地球物理研究新进展

杨文采

(地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 102849)

[摘要] 当前,石油天然气资源勘查开发研究的关键问题集中在提高地震勘探分辨率和信噪比、确立实用的裂隙性储层弹性波模型和发展新技术勘查深层油气田三个方面。这些研究促进了应用地球物理学理论和方法的深入发展。本文根据出访西欧及自己的研究实践对以上三方面的进展作一评述。

[关键词] 应用地球物理, 反射地震, 油储地球物理

1 前言

近10年来,中国和世界各国都十分重视油气资源勘查开发的基础研究^[1-3],尤其是对关键的地球物理方法技术,力图解决以下三方面的问题:(1)提高地震勘探的分辨率与信噪比,以揭示难识别的构造圈闭或岩性圈闭,并进一步描述砂岩孔隙性储层;(2)建立实用的裂隙性储层的弹性波传播模型及其地震响应规律,为查明这一类油气储层提供新的方法技术;(3)由于浅层强反射使来自深层的信号十分微弱,造成深层地震油气勘查的困难,需发展新的深层油气勘查物探方法。这三方面的问题也正是我国石油工业发展的关键问题。下面就作者近年科研实践与出国访问期间与外国专家的交流体会对此作一综述,请同行专家指正。

2 反射地震研究

无论是在沉积盆地勘查石油天然气还是研究地壳内部构造,反射地震都是最重要的方法技术,近年来采集方法技术和仪器装备都有明显改进。例如,德国的矿业研究院研制的SUMMIT地震仪系统,已不再是集中安装在汽车上的笨重仪器,而是更适合于野外作业的散布式遥测地震采集系统。它没有主机,只包含一个个重量2kg的手提小盒,对应多个检波器组合的地震道,用普通的双芯电线与一个便携式微机相连。在接收小盒内包含双道前置放大器、滤波器和C/D转换器,连向一个特殊设计的信号处理器和存储器芯片,动态范围达150db。如果不用地震检波器而用线圈作探头,这种接收小盒还可用来作瞬变电磁测量。

为取得地层或油气储层的弹性参数,井中和地面的三分量测量已逐渐变成常规性采集。在海上作业时由于海水不是横波的载体,已把三分量地震检波器沉入海底进行接收。三分量震源激发加三分量地震接收是研究地层各向异性的理想采集方法,但因成本过高而且数据处理技术跟不上,目前仅在几个油田上做试验,以便估计其应用价值。

本文于1995年8月11日收到。

在地震处理上,近年来开始采用新的非线性处理算法,以提高地震剖面(或三维波场)的信噪比和分辨率。例如,用反传神经网络算法自动识别三分量地震记录中的信号,制作振动极化图以区分地层岩性;用自组织神经网络算法自动追踪同一层位的反射信号等;用小波变换技术对地震记录进入时频分析,以取得准确的瞬时频率作地震相分析,并取得准确的瞬时相位区分不同的构造单元,其分辨率比原来用频谱分析方法明显提高。非线性算法中应用较早的仿真淬火算法,不仅在静校正上取得良好效果,在波阻抗反演上的应用也颇具特色;在地震上应用较晚的遗传算法,用于叠前深度偏移中确定与修改波速模型也取得进展。

德国基尔大学研究了一种共反射元法(CRE),以革新传统的叠加处理。对非水平反射体,传统的共中点叠加因反射点散布而丧失空间分辨率,因而要用倾斜动校或叠前偏移来补救。而共反射元法用射线追踪确定来自共同反射元的道集,然后再叠加,既可提高信噪比又避免了反射点散布造成空间分辨率的损失,从而避免了叠前偏移的繁复计算。目前这种方法正转向实用,以便克服局部不均匀性的影响和要求双边排列给施工带来的麻烦^[4]。

大量研究表明,叠前深度偏移处理是提高地震空间分辨率的最有效方法之一,目前的问题主要是降低计算成本和准确估算偏移波速。降低计算成本的问题可从两方面解决:一是用并行机和并行算法提高计算速度,二是研究更快的三维射线追踪算法。波速问题比较困难,因此有人认为短排列的反射记录不包含深部波速信息,因而要在采集时布置长排列取得波速信息。例如,在测区内布置比反射地震稀的网格,在其交点上用广角测量采集数据,然后用反射地震层析成像重建储层地震波速模型,再用于叠前偏移计算。在处理中用偏移速度分析逐步修正不准确的波速模型。在反复迭代中使用以下准则:只有使用了正确的波速模型,由偏移取得的共反射点道集才出现水平的同相反射波列,也可以取得叠前偏移的预期效果。但是计算速度慢、成本高。最近的研究表明,共炮点偏移道集在数学上是波速的泛函,它随波速的变化产生有规律的变化。由于相邻道集的反射来源于共同的波速模型,准确的波速模型给出了相邻偏移道集之间最大的相似度。根据这个原理,已提出多重偏移拟合法确定叠前偏移的波速模型^[5]。我国杨长春等人提出的相似函数反演法也是一种类似的叠前偏移新技术^[6]。即定义多重偏移道集的相似度,计算它相对于波速模型的导数,由相似度取极大计算波速模型的修改量。

为提高叠前偏移的计算速度,荷兰 Delft 大学用单程波方程导出的单程波局部算子引起广泛重视。在计算时,假定算子作用范围内介质局部均匀,在频率域单程波方程的解可简化为

$$P^-(x_a, x_s) = \int W^-(x_a, x) R^+(x) W^+(x, x_s) S_0^+(x_s) dx$$

其中 P^- 为上行波地震数据矩阵, x_a 为接收点, x_s 为炮点, W^- 为上传算子, W^+ 为下传算子, R^+ 为反射函数, S_0^+ 为子波函数。注意上式只对于点 x 周围局部内才有相同的算子 W^- 和 W^+ , 否则它们要根据波速模型重新计算。

在地震反演方面,由于地震反问题固有的非线性特点,线性与广义线性反演方法的局限已被广泛认识,主攻方向转向非线性反演,包括仿真淬火、遗传算法和混沌反演三种主要方法。由于尚未找到生物工程与地震反演方面的共同性,遗传算法在地震反演中的应用目前还处于摸索阶段。分层模型的仿真淬火算法在波阻抗反演上进行了不断的改进,形成了接近实

用的 ISIS 软件。这些改进主要是结合地震勘探加了五方面的约束,即:用子波的统计反演确定地震道的能量范围,用声测井资料作为地震反演的先验估计,用反射的模式限定声阻抗的水平连续性,对反射系数的极大值和极小值进行硬约束。经过改进之后仿真淬火反演的解空间已大为缩小,使反演的计算成本降低到可接受的程度。混沌反演是非线性地震反演方面计算最快的方法,自作者于 1993 年公开发表后受到国外重视^[7],进入了欧美各大科技检索系统。1995 年应德国地球科学与资源研究所等单位的邀请,去西欧交流了混沌反演的理论与方法,并将它与其它方法进行比较。通过对德国南部气田上反射地震资料的反演并与以往西方三大公司波阻抗反演结果的对比表明,混沌反演取得的结果分辨率最高,与钻孔声测井资料最为接近。混沌反演还试用于信噪比很低的海洋深反射记录,揭示了北苏拉威西海洋壳消减带构造的细节。

3 多相介质与各向异性

裂隙性地层具有各向异性特征,其地震波传播规律复杂得多,认清这些规律有助于了解地层的裂隙发育程度和方向,对油藏工程以及地下工程基础研究非常有用。由于裂隙中充有地下水等流体介质,因此裂隙性储层在物理上的准确模型相应于各向异性的多相介质。多相介质中的经典地震波理论是 Biot 在 50 年代建立的,他用小球体代表岩石的固体格架,导出了地震波传播的方程组,成功地解释和预言了孔隙性砂岩储层中的波动现象,令人赞叹不已。然而,近年来的理论和实验研究,证明了 Biot 理论不适合于裂隙性储层,因为它没有考虑岩石颗粒之间狭缝式的流体通道,它们在波动时的张合对岩石的渗透率起决定性影响。据此, Murphy 等人提出了一种新的模型,被称为局部性模型。试验结果表明,它更为符合裂缝式岩石中地震波传播的情况^[8]。以后 Murphy 模型进一步发展成八边型截面的岩石格架模型,以便同时包含孔隙性储层和裂隙性储层两种情况,这些理论研究成果对声测井等储层参数描述有重要指导作用。

多分量地震勘探不仅可以提供地下构造信息,还可以提供横波速度和地层各向异性参数,对岩性研究和油气储层追踪非常有用。在测量垂直地震剖面(VSP)的三分量时,用最大熵反褶积等方法可以同时提取纵横波速比 V_P/V_S 和品质因素比 Q_P/Q_S ,以进一步用于推算地层的沉积类型、饱水度和裂隙发育程度。此外,利用钻孔中管波特征有可能圈定裂隙带。这是因为在三分量 VSP 测量中,入射纵波挤压裂隙带中的流体,而形成的流体脉冲诱发了次生管波。这种管波的振幅与裂隙带的渗透率有关。目前正在改进裂隙带模型,以使用管波振幅计算渗透率^[9]。

地震各向异性的理论研究早已预测,各向异性地层中地震波传播发生偏振,透射横波将分裂为快横波和慢横波。如果观测到快慢横波,可由其时差和振幅差异计算地层的各向异性系数。裂隙性储层是典型的各向异性层,建立它的地震波传播模型可以由各向异性系数计算裂隙发育方向和裂隙度,为裂隙性储层描述提供依据。近年来,在三分量 VSP 记录中已观测到多例横波分裂现象,其中以德国大陆深钻中的 VSP-VP101P 剖面记录最令人信服。这里震源为地面垂直激发的可控震源,离井口 160 m。井中三分量接收,点距为 80 m。在深度为 3160 m 的原始记录中,南北向水平分量记录,显示连续性很好的快横波和慢横波,时差约为 100 ms。快横波的振幅比慢横波弱,而慢横波与井孔斯通利波连接成一个波组^[10]。经计算,纵波、

快横波和慢横波的平均各向异性分别为 2%，14%和 5%。经实验证实，此各向异性层与裂隙密集带和其中甲烷含量有关。

应注意的是，除裂隙带外，薄的互层介质、页岩片麻岩等岩层也具有宏观各向异性，这和各向异性岩层中地震波传播的理论研究有关，对地震勘探中的波传播计算和偏移处理有意义。

4 深部油气勘查

我国有近 300 km² 的沉积盆地，上部为几千米中新世代陆相碎屑岩所覆盖，其中发现了大量的油气田。但是，目前东部主力油田，如大庆、辽河等，储层主要为白垩第三系地层，深度一般在 3 km 以内，其下方还有巨厚的下中生代及古生元古代沉积，仍含有丰富的油气前景。近年来，在胜利油田、鄂尔多斯及塔里木等地古生代地层中都发现了优质油气田，但无论与已发现的油气储量相比，还是与潜在的油气远景相比，储量都很小。因此，勘查埋深 4—10 km 的深部油气田还有很大潜力。

地震勘探是勘查油气田的最主要技术。由于沉积盆地上部常发育良好的反射体，使震源激发的能量大部分反射回地表，因此用反射地震勘查深部油气田技术上难度很大。目前如进一步提高数据采集处理水平，有可能将地震勘查的深度提高一大步。首先要从地震采集入手来提高深层油气勘查技术。例如，采用穿过地表低速带的深井震源，压制浅部反射的中频带高动态范围记录仪器，非线性扫描和千次垂直叠加的采集系统，以及检波器下井的变偏移距反射采集系统等。在地震处理方面，采用巨型并行计算机和研究非传统共中点叠加处理软件系统，尤其是改进叠前偏移和波场反演技术将可望在近期内取得效果。

鉴于反射地震方法的局限性，在深部油气勘查中采用地震与电磁法并重的方针看来是适宜的。例如，我国华北在下元古代就沉积了一套碎屑岩和碳酸盐岩（如滹沱群），中上元古沉积层更厚，而且微古植物丰富，有天然气生储条件。华北古生代有巨厚的浅海相沉积，由于埋藏深度大，目前尚未进行系统的勘查。利用勘查深度大的大地电磁等物探方法来圈定与深部天然气储层有关的低阻层位，并进一步提高大地电磁法的空间分辨率，以适应深部天然气勘查的需要，值得高度重视。

在油气勘查方面，新近发展的多道瞬变电磁法（MTEM）越来越受到广泛重视。瞬变电磁场满足的方程与地震波方程在频率域是等价的，通过所谓的 Q 变换可以把扩散场转化为等效波场。尤其是采用了多道接收和多次覆盖技术之后，可以把 MTEM 记录转化为与地震时间剖面类似的电磁剖面，从电性角度与地震资料进行对比，以提高油气储层描述的水平。今年春在格拉斯哥召开的欧洲勘探地球物理学家年会（EAEG）上，有学者介绍了用 MTEM 监测地下天然气开采的试验结果。由于水与天然气电阻率比为 1：20，有明显差别，储层内电阻率图象可准确地反映水与天然气的位置。在试验中采用长偏移距双极电流源，每年春秋用同样的 MTEM 装置重复测量，用二维反演技术重建地下电阻率图象，其变化显示出储层内水和气开采前沿的变化。

综上所述，近年来用于油气勘探开发的基础研究取得了全面的进展，为进一步发展油气勘查和储层描述新技术提供了理论基础。为保证我国经济高速发展有足够的能源资源支撑，有必要加强这方面的应用基础研究。

参 考 文 献

- [1] 杨文采, 李幼铭. 油储地球物理学的开拓和发展. 中国科学基金, 1990 (2): 23—25.
- [2] 杨文采. 应用地震学中的某些前沿问题. 中国科学基金, 1991 (2): 30—35.
- [3] 刘光鼎, 李幼铭. 我国油储地球物理学研究展望. 科技导报 (广州版), 1990 (4): 98—102.
- [4] Steentoft H, Rabbel. Seismic mapping of the Marmousi data set with the common reflection element method. *Tectonophysics*, 1994, **232**: 355—363.
- [5] Chavent G, Jacewitz C A. Determination of background velocities by multiple migration fitting. *Geophysics*, 1995, **60**: 470—490.
- [6] 杨长春, 刘兴才, 李幼铭等. 一种地震叠前深度偏移的方法和实例. 地球物理学报, 1996 (待刊).
- [7] 杨文采. Nonlinear chaotic inversion of seismic traces. , *Chinese J. Geophysics*, 1993, **36**: 241—256.
- [8] Murphy W F, Winkler K W, Kleinberg R L. Acoustic relaxation in sedimentary rocks: dependence on grain contacts and fluid saturation. *Geophysics*, 1986, **51**: 757—766.
- [9] Li Y D, Rabbel W, Wang R. Investigation of permeable fracture Zones by tube-wave analysis. *Geophys. J. Int.*, 1994, **116**: 739—753.
- [10] Rabbel W. Seismic anisotropy at the continental deep drilling site (Germany). *Tectonophysics*, 1994, **232**: 329—341.

DEVELOPMENTS IN OIL/GAS EXPLORATION AND RESERVOIR GEOPHYSICS RESEARCHES

Yang Wencai

(*Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 102849*)

Abstract The key problems in recent oil/gas exploration researches include three aspects as follows: raising resolution and s/n ratio in seismic reflection exploration, finding the right and practical models of crack reservoirs for elastic wave propagation, and developing new techniques to find deep oil/gas fields. The researches in recent years have promoted the theory and methods in applied geophysics. This paper prospects the developments in these three aspects based on the author's research practice and visits abroad.

Key words applied geophysics, reflection seismology, reservoir geophysics