

# 应用地震学中的某些前沿问题\*

杨文采

(地质矿产部北京计算中心)

**【摘要】** 本文所讨论的是对应用地震发展有较大影响、近期有可能取得进展而引起广泛关注的一些问题。在应用方面包括:沉积盆地演化的定量解释,隐蔽沉积圈闭的直接识别,储集层的地球物理描述和动态监测,地球精细构造的揭示和成象。在理论方面的问题有:基于波动方程的反射地震处理,向量地震资料采集、处理和解释,高维波动方程的层析成象反演,宽尺度地球不均匀性及其地震波动响应等。在交叉学科的相互渗透中,应特别注意非线性动力学的概念和方程对地震正反演问题的启示。

应用地震学是在能源、矿产和工程各个领域,应用地震学原理作地球内部调查的油气地震、矿产地震、工程地震(又称浅层地震)、开发地震及地壳上地幔地震测深等各分支的总称。建立于本世纪20年代,60年代以来得到飞速发展。作为一门年轻的应用学科,从理论到应用都存在许多尚待探讨的问题,这里仅讨论其中对学科发展影响较大而且近十年内可能取得突破的四个应用方面的课题和四个理论问题。

## 一、从应用方面提出的前沿课题

推动应用地震学发展的动力主要来自现代社会对能源的依赖和需求。因此,下述的四个前沿课题的前三个都与石油工业有关。

### 1. 沉积盆地演化的定量解释

沉积盆地研究可分为资料采集、盆地演化综合分析、计算机模拟和油气评价四个环节(图1),其中用计算机进行盆地演化动力学过程的仿真乃是近年来石油地质学发展的最重要成就之一。然而,盆地模拟的成败取决于输入的初始数据,如不同时期盆地发育的定量模式、盆地内沉积层砂页岩比及渗透率、水深及盆地沉降速率、古地温梯度及岩石热导率等是否准确。横穿盆地的地震剖面乃是这些数据取得的主要依据之一。

例如对盆地地质演化史的推测,首先可通过反演法取得定量的地震解释剖面,它显示各地震层位和不同时期的断裂、褶皱,以及各层的地震波层速度。通过层位对比、断层接合、褶曲拉平和逐步剥层等方法,结合地质和地球化学资料和地震地层学分析,可逐步回推地质时代,取得不同时代地质演化模式的系列图。如果只要求取得盆地演化过程定性的说明,这种方法在西北欧的北海盆地和中东都曾成功地用于油气勘探和评价。然而现在要求盆地演化模式定量化,其误差小于盆地模拟规定的要求。

\* 本文是作者在1990年10月13日中国地球物理学会第六届年会上大会报告的提纲。

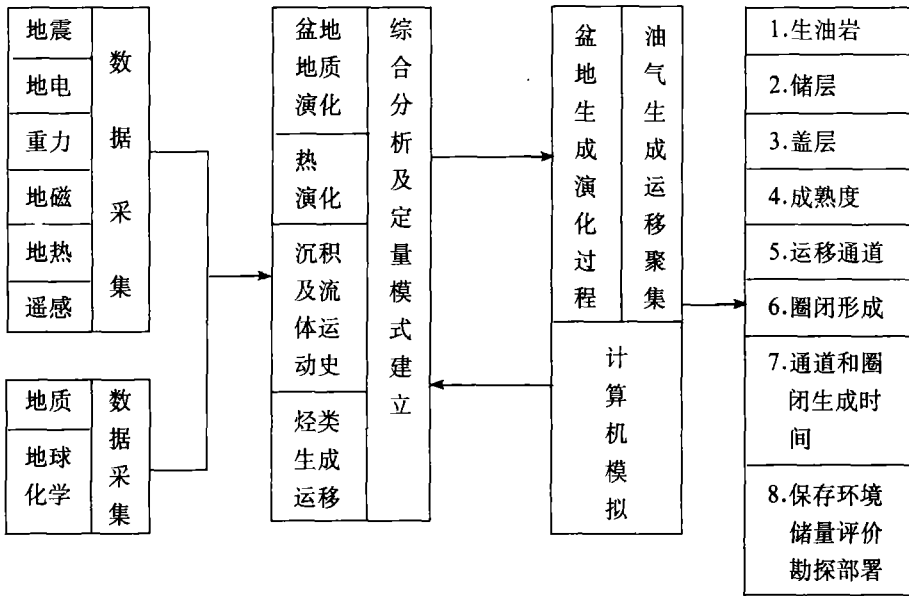


图1 盆地研究的四个环节

盆地演化定量解释的基础资料之一是定量的地震解释剖面,首先要考察其准确程度。目前由反射地震提供的定量解释剖面并不能为恢复盆地演化的定量模式提供准确的依据。首先,“地震层”往往与沉积层位和岩性层不吻合。此外,由层序分析取得的地震层内岩性和地震波速度常常有明显变化,而目前的地震解释剖面是基于均匀层状地球的假设通过数据处理取得的。为了取得准确的地震解释剖面,要研究地层不均匀性及相应的地震处理和反演方法,并实现构造和地震波速的同时成象。

## 2. 地层圈闭的直接识别

除了构造圈闭以外,近年来,地震勘探在发现隐蔽的油气圈闭方面也取得一些成功。隐蔽圈闭指的是由岩性变化引起的地层圈闭,由剥蚀引起的不整合圈闭及由侵蚀堆积引起的古地形圈闭等。与构造圈闭的地震响应比较类似的古地形圈闭和某些不整合圈闭比较容易识别,但地层圈闭的识别比较困难,目前只能采用间接方法,如地震地层学分析、地震合成或地震波振幅分析等。地层圈闭中的一个主要类型,为岩性横向变化引起的所谓沉积圈闭(如灰岩中的白云岩,泥岩页岩中的砂岩),以及非渗透岩石中的裂缝型储层圈闭(如中东主要的碳酸盐岩油田及我国鄂尔多斯气田)。对于这些类型的圈闭的地震识别,除了提高分辨率以揭示圈闭内部的构造外,还要进行波速与波阻抗的反演,以揭示圈闭内部的分层岩性特征,且在理论上涉及到宽尺度地球不均匀性的地震响应和反演的问题,反演成象的分辨率要求也比盆地研究高得多。1990年7月,世界上最大的两家应用地球物理协会SEG和EAEG在剑桥大学联合召开了“地震速度估计和实际应用”的专题研讨会,可以说明地震波速反演成象是当前应用地震学研究前沿中的一个热点。

## 3. 油气储集层的地震描述和动态监测

80年代才逐渐兴起的一个新的地球物理分支——油储地球物理学<sup>[1]</sup>,其核心是所谓的开

发地震学,是服务于油气田开发工程的应用地震学分支(图2)。与油气勘探不同,开发地震学的主要目标是描述储集层岩性、孔隙度、饱和度和渗透率的空间变化,以及强化采油过程中储层孔隙流体性质的变化。原来这些参数只能通过测井及岩芯分析等方法获得井壁上的数据,而现在要通过地震学方法给出它们的空间分布图象,可以说是应用地震学中关键难题,它的解决,涉及到应用地震学理论和方法的全面升级,对采油及其它许多工程问题将起到促进作用。

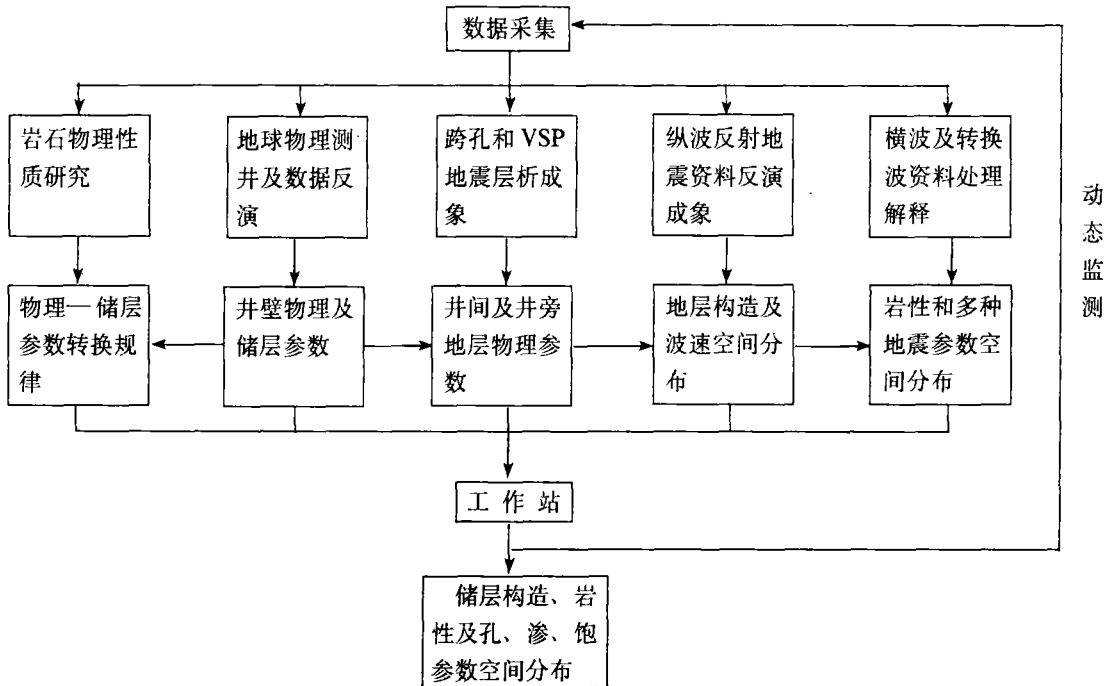


图2 油储地球物理学的研究内容

#### 4. 小尺度异常体和地球精细结构的成像

地震勘探业已证明<sup>[2]</sup>,地震探查的纵向分辨率的极限为 $1/4$ 波长(瑞利分辨率极限)。然而,许多探查目标的单向尺度却是小于或等于 $1/4$ 波长的物体,如油气储集层,工程基础中的裂缝或弱化带,地壳上地幔中的古消减带、岩浆囊等。如果地球内部成像的分辨率能突破瑞利极限,则有助于解决许多悬而未决的科学和应用问题。例如,为了判别670km深的密度界面是相变带还是化学界面,并为地幔对流模式属单层还是双层提供佐证,有人利用地震层析成像技术对秘鲁附近消减带下插深度进行研究,试图从地震体波速度扰动的范围和深度论证670km界面的性质。虽然他们的成像结果提供了有利于相变界面的资料,但由于对小尺度干扰体地震层析成像的分辨率和可靠性存在怀疑,这一成果尚未得到公认。近年来,随着地震采集仪器的更新换代和数据处理技术的飞跃发展,地震探测的分辨率已不断提高,突破瑞利分辨率极限的理论探讨已开始受到广泛的重视。

## 二、理论研究的前沿课题

### 1. 基于波动方程的反射地震处理

经过30年的发展,目前用数字地震处理直观表现地质构造已取得成功。但是,由于理论

上的缺陷,这套方法也逐渐暴露出一些问题。例如,叠偏剖面上出现许多无法解释的波组,很可能与处理过程制造的假象有关。实际上,原始的共炮点记录反映的各种波的类型常常是清楚的,可与弹性波方程的数值模拟对照。然而,经处理后,所得结果满足什么方程反变得不清楚了,波的类型及震相难以分析。

从本质上看,目前的地震数字处理系统类似于基于几何地震学的构造制图技术,其目的是提供反映地下波阻抗界面构造的地震映象。现今我们关心的是高分辨率的地震波速分布的图象,这就要求从描述共炮点道集的弹性波动方程出发,探索如何把地震记录转换为满足地震反演假设条件的数据集的新处理过程,其中的每一个环节都必须用方程准确的描述。对于传统地震处理方法,也要进一步根据波动理论加以修正。例如,作为地震处理第一步的静校正,要把炮点和检波器换算到同一基准面。用数学表示,由波场 $u(\vec{s}, \vec{g}, t)$ 求 $u'(\vec{s}', \vec{g}', t)$ ,其中炮点 $\vec{s}=(x_s, y_s, z_s)$ ,接收点 $\vec{g}=(x_g, y_g, z_g)$ ;在基准面上 $\vec{s}'=(x_s, y_s, 0)$ , $\vec{g}'=(x_g, y_g, 0)$ 。目前静校正是计算时差 $\tau$ ,并令 $u'(\vec{s}', \vec{g}', t)=u(\vec{s}, \vec{g}, t-\tau)$ 。这样做显然不符合波动理论(如惠更斯定理或克希柯夫方程),因为 $u'$ 不仅与一个点上的波场 $u(\vec{s}, \vec{g}, t)$ 有关,而且与整个边界或波前面的波场有关。只有从波动方程出发建立地震数字处理体系,波动方程反演和波场层析成象才有坚实的理论依据。

## 2. 向量地震资料的采集、处理和解释

在固体地球物理研究中,多用三分量检波器观测地震波,但长期以来没有在地震勘探中使用。近年来,随着研究储集层的开发地震学的兴起,地面和井中的三分量检波器和定向震源已逐渐被研制出来,使所谓的九分量(三个方向的震源激发,接收三个方向的振动)地震采集成为可能,使地震采集的信息量提高近一个级次。这种多分量的地震采集系统已经进行了少量现场试验,受到应用部门广泛的重视。

一般,这种系统采集的波场有九个自由度,即炮点和接收点各有三个自由度,另外三个自由度为时间、震源方位和接收器方位角。如何从这种新的地震记录中提取出地层信息,涉及一系列理论上的新课题,要建立向量地震处理的理论和方法。为此,应从各向同性完全弹性介质中的弹性波方程出发,首先考虑不同类型的波解耦的可能性。对于二维的层状均匀介质,弹性波方程中SH波自动解耦,只有P波和SV波是耦合的,这时九分量地震记录中只有五张记录有用。如果进一步研究出将P波与SV波解耦的方法,则目前对P波的许多处理技术也可用来进行向量地震处理,不过这一步必须特别慎重。经过向量地震处理可以发现一些对S波敏感的构造,并提供纵横波振幅比、波速比等新的信息。值得注意的是,这种以均匀各向同性层状介质为前提的解耦处理方法不够准确严密,还应研究不解耦的综合向量地震处理的方法。

九分量地震采集的目的之一是研究地层的各向异性,但对于地震解释,还必须研究各向异性介质中的弹性波动方程。页岩和裂缝型储层岩石都具有明显的各向异性,使地震波的传播发生偏振、双折射,产生异常的振动极化和横波分裂等可以被观测到的现象,这些现象的研究很可能是解决裂隙型油气储层描述的主要手段。近年来,英国等一些西方国家都设立专门的各向异性研究项目,以期在向量地震解释方面取得突破。

## 3. 高维波动方程的层析成象反演

波动方程反演和地震层析成象是80年代地震学研究中最活跃的领域之一,其理论框架示于表1。现已证明,一维声波方程系数项反问题存在精确解,也研究出求数值解的多种稳定算

法。然而,一维波动方程反演的实用价值不大,而高维波动方程反演困难很多。目前高维波动方程反演的方法可分为五类<sup>[3]</sup>。然而,在实际应用中这些方法计算费用太高(一个 CMP 道集的地震记录的反演在‘克雷’超大型机上要算几个小时),推广还有困难。

在原理上,波动方程反演的最主要问题出在线性化上。一般情况,波动方程反问题是非线性的,仅在介质均匀扰动极弱时趋向线性。目前采用的线性化方法(见表 1)实质是摄动法,要求比较准确的初始模型或背景波速,否则计算不收敛。就好比线性反演的适用范围只是大海中的几个孤岛,而摄动法作线性化则是把孤岛扩大为海滩,对非线性反问题而言要研究反问题本身的非线性特点,并在此基础上建立地震反演的非线性算子理论。为说明线性化存在的问题,试看一下非线性广义最小二乘反演的例子:

$$\Delta m_k = [F_k^T F_k + \lambda I]^{-1} F_k^T \Delta d_k \quad (1)$$

$$m_{k+1} = m_k + \Delta m_k \quad (2)$$

式中  $m$  为地球模型,  $\Delta m$  为其修改增量,  $F$  为 Frechet 微商算子,  $I$  为单位算子,  $\lambda$  为阻尼系数,  $\Delta d$  为数据拟合差,下角标  $k$  表示迭代次数。由线性化得到的(2)式实际上是不正确的,因为(1)式中  $F_k$  是由  $m_k$  求出的,因此  $\Delta m_k$  与  $m_{k+1}$  并非如(2)式所示的线性关系,当初始猜测  $m_0$  远离真实地球模型时,迭代过程就象没有舵的小船,找不到目的地。为了减轻这种线性化的缺欠,有人采用蒙特卡洛法选取不同的初始猜测,尽量使其中某些初值接近“孤岛”,这又大大增加了计算成本。看来,有必要从地震反演的特性出发,推导用于代替(2)式的新的非线性迭代格式,在这方面,吸收非线性动力学的某些概念和思想是有益的。

表 1 波动方程反演主要方法的比较

序号	原 理	线性化处理	算 法	应 用
1	约束优化+先验信息	Frechet 求导+ 牛顿迭代格式	有限元(有限差分) +线性方程组	目前到水平层状均 匀的 CMP 道集
2	(广义脉冲谱)后化为椭圆方程 混合边值问题求格林函数	先用牛顿迭代格 式分解波动方程	正则化方法解第一 Fredholm 积分方程	限于连续介质假设, 弹性波方程
3	衍射地震层析反演	Born Rytov 近似	滤波反投影	主要用于跨孔和 VSP 采集 数据及均匀波速的数据
4	逆散射+克希柯夫 波场反推	Born 近似	解第一类 Fredholm 积分方程	以反射地震为主
5	广义拉当变换求逆+ 福里叶积分算子展开	Born 近似	积分几何变换 +射线追踪	跨孔, VSP 和反射全部可用 对反射转化为奇性反演

注: 1) Tarantola, 张先康; 2) 陈永明, 刘家琦, 谢干权; 3) Devaney, 吴如山; 4) Coben, Bleistein; 5) Beylkin, 栾文贵, 李世雄。

#### 4. 地球宽尺度不均匀性和地震波传播

狭义地讲,地球物理学的对象就是研究地球的不均匀性及其演化过程。研究越深入,了解到不均匀性的尺度就越小,而从整体而言,地球的不均匀性是宽尺度的,可以从几毫米到上千

公里,而且具有一定程度的自相似结构。由于地球不均匀性的尺度可以从远小于地震波长变化到远大于地震波长,因此地震波在地球中传播便出现了许多复杂现象,近年来不少人从散射角度对这类问题进行了探讨,但出发点仍然是经典的波动理论<sup>[4]</sup>。

由于地球的不均匀性具有自相似性,自然使人联想到非线性动力学是否与所讨论的问题有关。地震波在地球内传播时能量不断地分裂(发生在不均匀体界面或端线),这个过程看来也是非线性行为。总之,考虑了宽尺度的地球不均匀性之后,许多问题已经超出了经典地震波理论所能解决的范围,也许要从相关的前沿学科中借用一些新的思想和概念发展新的地震波动理论。

应用地震学中前沿问题的解决与现代数理和信息科学研究前沿的进展密切相关,取决于现今科学技术的总体水平。例如,非线性理论与非线性动力学与地震反演和地球宽尺度不均匀性关联,在盆地研究和油储地球物理中混沌理论的概念和方法也可起到指导作用<sup>[5]</sup>。

### 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年,第2期,23—25页。
- [2] R.E.Sheriff et. al., Exploration Seismology, Cambridge Univ. Press, 1983.
- [3] 杨文采,地球物理反演和地震层析成像,地质出版社,1989。
- [4] 吴如山等编, Scattering and Attenuation of Seismic Waves, Birkhäuser Verlag, 1989.
- [5] 陈颢编,分形与分维在地球科学中的应用,学术期刊出版社,1988。

## FOREFRONT PROBLEMS IN RESEARCH OF APPLIED SEISMOLOGY

Yang Wencai

(Beijing Computer Center of MGMR)

### Abstract

Problems which attract broad attentions and have important influences in development of applied seismology are discussed. From the angle of application, they are: (1) quantitative description of evolution of sedimentary basins; (2) recognition of subtle stratigraphic traps; (3) geophysical delineation and monitoring of oil/gas reservoirs and (4) imaging small-scale inhomogeneity of the Earth. From the angle of theory, the problems include (1) reflection data processing based on the wave equations; (2) vector seismic data processing; (3) tomographic inversion of the wave equations and (4) wide-scale inhomogeneities of the earth and seismic wave propagation. Stress is also placed on the nonlinear dynamics whose concepts may be influential in study of applied seismology.