

新世纪地球物理发展和展望

目 录

0.新世纪的地球物理	Larry Lines 等著 ,严建文译(1)
1.新世纪的地震数据采集.....	Steve Roche 著 ,严建文译(2)
2.地震信号处理新千年展望.....	Peter Cary 著 ,赵改善译(3)
3.地震成像.....	Samuel H. Gray 著 ,方伍宝译(6)
4.地球物理反演的过去、现在和未来.....	Sven Treitel 等著 ,高林译(10)
5.油藏地球物理.....	Wayne D.Pennington 著 ,严建文译(15)
6.对地震属性的理解.....	Alistair R.Brown 著 杨勤勇译(21)
7.地震岩性分析技术的最新进展.....	John P.Castagna 著 ,王炳章译(23)
8.地震各向异性.....	Leon Thomsen 著 ,朱成宏译(28)
9.多分量地震学-下一次浪潮.....	Thomas L.Davis 著 ,严建文译(30)
10.时延地震油藏监测.....	David E.Lumley 著 杨勤勇译(31)
11.新世纪的工程和环境地球物理.....	Don W.Steeples 著 朱海龙译(35)
12.世纪之交的重力与磁力勘探.....	R.O.Hansen 著 ,曹辉译(41)
13.新世纪的电磁勘探.....	Karen R.Christopherson 著 ,曹辉译(44)

新世纪的地球物理

Larry Lines, John P. Castagna 和 Sven Treitel 著 严建文译

进入 21 世纪,我们注意到在地球物理领域发生了许多变化。如本文所要描述的那样,通过各种定量方法(如 3D 地震革命)来进一步提高地球物理数据的质量和实用性仍然是大势所趋。从更大范围来看,这种变化是与计算技术和相关学科的发展紧密相连的。计算技术和相关学科的发展使得即使是在我们的模型不断地逼近于真实地质模型的条件下,我们也能够有效地实现各种地球物理方法,不断地提高我们对这些方法的理解水平。因此,与过去任何时候相比,地球物理方法现在能够提供更大距离处的具有更高信噪比的更为清晰的图像。相应地,勘探人员的工作效率要远远高于是 10 年前。地质资源在不久的将来会枯竭的预测仍然被证明是错误的,由于地球物理进步的影响,情形并不如某些预言家所预测的那样。我们期望这种发展的趋势一直延续到 21 世纪,并且在我们的前面有许多令人鼓舞的方法出现。要注意的一点是,尽管研究的推动作用暂时不会体现出来,但目前关于研究的经费投入不足,这会导致未来地球物理数据改善的速度降低,从而最终导致较低的勘探成功率。不知道未来的投资者是否意识到,“产量”的降低是目前研究领域的投入不足的直接后果,但这种结果我们会看到的。

本专辑的目的就是阐述勘探地球物理的现状:我们已经达到什么水平,我们正处在什么水平,在新的世纪里,前景是什么。我们向各学科领域的学科带头人征集了 13 篇论文,这些文章论述了地球物理研究和开发的过去、现在和未来的方向,文章的题目是:

- (1)地震成像(Samuel H. Gray)
- (2)地震信号处理--新世纪展望(Peter Cary)
- (3)地球物理反演的过去、现在和将来--新世纪分析(Sven Treitel 和 Larry Lines)
- (4)油藏地球物理(Wayne D. Pennington)
- (5)新世纪的工程和环境地球物理(Don W. Steeples)
- (6)新世纪开始时的重磁法(R. O. Hansen)
- (7)新世纪的电磁勘探(Karen R. Christopherson)
- (8)地震各向异性(Leon Thomsen)
- (9)地震岩性分析技术的最新进展(John P. Castagna)
- (10)对地震属性的理解(Alistair R. Brown)
- (11)多分量地震学--下一次浪潮(Thomas L. Davis)
- (12)时延地震油藏监测(David E. Lumley)
- (13)新世纪地震数据采集(Steve Roche)

如所有的预测那样,有些预测可能是错误的、出乎意料的,有些甚至会发生不可预测的革新,这就是技术发展的特征,它使得地球物理成为一个刺激人和吸引人的领域。我们期望读者从这些文章中能受到启发。

新世纪的地震数据采集

Steve Roche 著 严建文译

当我们跨入新世纪时，地震数据采集处于一个很重要的地位，这是因为与油气工业下降趋势有关的地震采集队伍过剩，采集技术实质上被“冻结”在其应有位置上。以前活跃在地震数据采集研究领域的一些公司已经限制其研究活动了，或干脆取消了研究。与通过改进采集方法来提高地震数据分辨率有关的一些提议正在研究中，但它们对直接带来采集效益的提高具有更好的效果。

在烃类油藏的经济生命周期中，与地震数据采集有关的花费是工程中最早的，也是很显著的。因此通常都有降低地震数据采集费用的压力。地震数据的价值是难以量化的。在 2 D 到 3 D 地震成像的发展中，我们所得到的经验就是地震数据在勘探和油藏开发中发挥了很大的作用。显而易见的是，地震数据的价值得到了很大的提高。提高地震数据价值的证据很多。钻井仍存在着不确定性，不是所有的钻井在商业上都是成功的。油藏模拟研究会生成非唯一的结果。如果地球物理学家利用 3D 地震数据，那么就能进一步改善油藏模拟模型和结果，并且提供关于油藏内孔隙度和有效渗透率空间分布的更为精确的模型。

目前，我们正处于一个地震数据采集技术应用研究和开发（R&D）缓慢增长的时期，采集 R&D 的进步可分为效率的提高（成本下降）或分辨率的提高（价值的提高）。分辨率的提高和成本的降低都是由数据采集开始的。但直接面向地震数据采集的研究资金有限，这样也许在降低成本的效果上短期会产生效果，但实际上通过不断地提高地震数据的分辨率将会获得长期的效益。

在下列三种条件下可获得更多的地震数据：（1）烃类需求的增长使目前的技术和地震数据采集是最有效的，同时提交的数据达到目前所能接受的分辨率水平。（2）提高降低地震数据采集成本的能力使得更多的项目经济上可行。（3）地震数据分辨率的提高明显地使较昂贵地震数据通过提高钻井成功率从而节省更多的成本。第三种情况使得地震数据的价值得到提高。

用于提高地震数据分辨率（也是提高地震数据价值）的采集技术包括陆上多分量技术，海上多分量（4C）技术，井中多分量技术以及设置永久地震检波器。这些方法都不是新方法。地球物理学家已经花了几十年的时间来了解综合利用 P 波和 S 波信息来更好地确定地下弹性岩石特性的潜在价值。阻碍多分量地震方法经济有效地应用的一些因素最终将由于技术的进步而得以克服，技术的进步包括计算功能的提高、计算容量的小型化、功能需求的降低（规模和负载的降低）、数据遥测能力的提高、以改进的矢量保真性进行数字传感和光导纤维传感器。

因此，当我们进入新的世纪时，我们将面临什么样的挑战呢？不考虑地震数据分辨率的空间采样仍然是一个讨论的焦点，窄方位角和宽方位角地震数据采集的考虑存在着一些积极的争论。这仅仅是一个争论，由于经济的压力，在空间采样上必须有一个折衷的方法来降低数据采集的成本。降低成本也好，提高经济效益也好，但都得有较好的空间采样和较宽的方位角分布。但更为困难的问题是什么呢？点接收和点震源的优点能胜过目前地震排列接收所提供的资料信噪比方面的优点吗？目前地震数据的全矢量波场记录的努力能导致多分量技术的成功地和经济有效地应用吗？或者说我们面临的更大挑战就是我们如何利用地震频率的更高和更低倍频程来记录、处理和解释地震数据？

地震信号处理新千年展望

Peter Cary 著 赵改善译

地球物理学家 Oz Yilmaz 在介绍其出版的 SEG 教科书《地震数据处理》时，选择了反褶积、共中心点叠加和偏移作为常规地震资料处理中最主要的三个处理步骤。自从 Yilmaz 的著作于 1987 年首次出版后，石油物探界发表了大量论文和会议报告，内容涉及到了地震处理的各个方面。但是，在 21 世纪初的今天，我想仍然是这三个处理步骤主导着地震资料处理的处理流程。当然，这并不是说在地震资料处理的各个方面没有取得什么大的进步，也不是说我们没有采用更先进的处理流程处理过一些数据。相反，我们对我们行业中那些真正的先驱者们极为赞赏，他们逐步引导着我们关于地震资料处理的思想不断前进，从野外模拟记录的检查，到通过反褶积、叠加、偏移等处理形成用计算机生成的关于地下模型的清晰图像，他们发明的那些算法或非常类似的算法，仍然是当今全世界进行常规处理的主要组成部分。事实上，我们常把 Carl Friedrich Gauss 看作最伟大的地球物理学家，因为他在 1823 年发表的最小化误差平方和的方法几乎应用于地震资料处理的方方面面，从反褶积到偏移。

因此，如果很久以前就已经取得所有基础性的进步，那么是什么促使地震处理人员继续开展这方面的研究呢？一个可能的回答是，处理中还有许多方面需要改进，这是一个无可辩驳的事实，但又是一个老掉牙的回答。实际上，如果你听一个地震成像专家来介绍的话，你可能会得出这样一种印象：很快就不会再需要数据处理员了，因为将来的偏移成像会包含我们目前称为处理的所有内容。包括定比、静校正、反褶积、反 Q 滤波、波场分离、叠加，当然也包括偏移在内的所有这一切，将从野外原始记录到完成处理得到最终结果的庞大的反演程序中的一部分。然而，从目前地震资料处理的工作中我并没有看到这种变化会在不久的将来发生。

我更相信，隐藏在我们不断变革的背后可能会有某种更为不同寻常的东西，它会大大改进地震资料的处理。在此让我来回顾一件我还是一个研究生时发生的事，这件事事实上使我对地震信号处理产生了长期的兴趣。那时一个地震处理“专家”对我表达了一个特别率直而认真的结论，大意是“地震处理基本上没有什么新东西可研究的了”。说这话的人肯定熟悉我的性格，因为我立刻被吸引住了。一个真正的处理员听到这个玩世不恭的结论一定会把它当成一个挑战，并竭力去证明它是错误的。我认识的大多数经验丰富的处理员不会只看地震剖面而不对它品头论足并加以改进的（包括对他或她自己的剖面）。我们都有这样一种癖好，希望从地震记录中挖掘出比记录本身自愿输出的更多的信息，通常这是一件无益的商业活动，就象要从骨头里榨出血一样。但是，我们偶而确实能取得真正的进步，这使我们陷入一种圈套。

但是，激发资料处理人员的因素很多，在过去的 10 年或 20 年里，我们真正取得了些什么？无疑，一个该领域的专家一定可以列出一个长长的清单，列举《GEOPHYSICS》杂志上发表的大量论文、每年 SEG 年会上宣读和张贴的 500 多篇文章，来说明近年来地震资料处理方面所取得的所有进展。但是，在我 15-20 年的技术生涯中，我大多数时间都是从事地震资料处理工作，因此我更喜欢用 15 或 20 年前与现在我们怎样处理资料之间存在的实际差异来衡量地震资料处理所取得的进步，我认为这样的分析结果比调查学术文章更加实在。

地震资料处理员的日常生活中最明显的差异是跟计算机打交道比跟地球物理打交道多。我从 20 世纪 70 年代初期开始使用计算机，我相信我可以代表对使用那些麻烦的

机器还记忆犹新的处理员表达我们的感受：我们庆幸那些日子已经成为过去！现在我们处理用的机器要好得多——彩色大屏幕用来对数据和流程进行显示和交互操作，磁盘和磁盘驱动器、磁带和磁带机可以容纳海量数据，运行更加可靠（至少大部分时间如此），内存比我们 20 年前做梦梦到的还要大，当然，我们今天每台台式机的计算能力比“美好的过去”整个公司用于资料处理的计算能力还要强。是的，关于“美好的过去”最好的事情已经在我们身后了。

计算机硬件上的这些发展对我们地震资料的处理工作产生了巨大的影响。现在地震数据采集所用的道数更多，面积更大，而处理周期却大幅度压缩，同时最后的处理结果的质量却大为改善。在过去的 20 年中，即使我们不考虑地球物理算法的改进，就是操作简便这一点就已经使解释人员大受裨益。因为处理操作简便，如观测系统定义和错误检查、初至拾取和检查、静校正解的试验、参数测试、速度拾取及修正等等，使处理人员提交成果的质量明显改善。

随着计算机的发展，三维地震勘探的数量和规模不断增长。处理算法和软件也随之发展，以便能处理新的空间维数。对于象带通滤波等单道处理算法当然没有问题，但对象 DMO、 f - k 滤波、偏移等多道算法就不是那样简单了。虽然海上三维测量采用多缆、多震源方式采集数据，其工作效率非常高，但由于震源枪的选择性点火方式而导致的空间采样问题在某种程度上来说对三维测量比对传统的二维测量更糟。这就使得处理员面临新的如叠前炮内插问题，要用新的处理方法（如方位时差校正）解决电缆羽状化问题。

三维采样对多道算法的影响，对于宽方位角的陆上勘探和窄方位角的海上勘探是不同的。一个炮点间隔等于四到五倍检波点间隔的典型二维叠前陆上数据集可以被描述为稀疏采样的三维函数（时间、沿线炮点位置、沿线检波点位置），一个三维叠前陆上数据集是一个稀疏采样的五维函数（时间、纵测线和横测线炮点位置、纵测线和横测线检波点位置），这就产生了怎样应用二维和三维算法的一个根本性差别。例如，用于单独的二维炮点道集的叠前偏移算法，就不能应用于绝大多数陆上三维数据，即使作了三维修改也不行，这是因为三维炮点道集无论是在纵测线还是在横测线上都存在严重的假频现象。只是最近几年“十字排列（cross-spread）”这个词（炮线和检波线相交叉采集地震数据）才进入了我们的词典，以期能解决这些空间采样问题。十字排列是宽方位角全三维数据集的采样充分的子数据集，每个子数据集可以单独成像。所以，从成像的角度看，十字排列是二维测量中炮点道集的三维模拟。

最近几年曾经开展过关于三维空间采样和三维测量设计对处理算法与最终处理结果影响的辩论，辩论是很有启发作用的，充满了朝气。参加辩论的地球物理人员中，有喜欢稀疏采样、低覆盖次数三维测量的，有喜欢规则采样、高覆盖次数三维测量的，有倾向于根据重迭十字排列设计三维勘探的，还有主张随机采样以减少采集痕迹的，认为稀采样和密采样得到的分辨率一样的，主张窄方位角而反对宽方位角的，等等。通过这场辩论我们受益匪浅，这是学术健康的标志，我们可以就我们不同的观点进行公开辩论。我相信，未来对问题将有更深刻的理解，或许不同观点会取得更大的一致。地球物理毕竟是一门科学，所以不会象宗教和政治辩论那样，我们的辩论最终会对问题得出一个客观的解答。但是，围绕着这场辩论还存在许多复杂的问题，所以可能会继续一段时间。

就 20 年前完全没有预见到的进步来说，那么位居最突出进步前两位的是双传感器（2C）海底地震数据采集以及最近的四分量（4C）海底地震数据采集。2C 和 4C 海底地震数据采集技术的出现，都引起了一系列的活动和兴奋，程序员、处理员和解释人员都在抓紧学习如何处理这些不同的数据。因为我们的行业正在向如何获得现有油藏越来越详细的信息方向迈进，时延（4D）4C 地震勘探将成为我们未来处理业务中的一个重要组成部分。确实，现在 4D 地震已经成为现实，许多公司已经对老的和新的三维地震资料进行了处理和重新处理，以解释其中的差异，研究储层特征的变化。

在压制多次波方面最近取得的重要进展是一种称作与地表相关的多次波压制技术。

这种技术已经取得了成功的结果，特别是对海上数据，它克服了严重限制了老式预测反褶积技术应用的关于地下介质的一维假设。但这种方法今天还没有普遍应用，使用成本还较高，不能简单地推广到三维数据，没有考虑诸如电缆羽状化、横向倾斜等三维效应。但不管怎样，与地表相关的多次波压制技术肯定会成为多次波压制武器库中一种较常用的武器。

在过去的 15 年中，采用抛物线或双曲线拉冬变换压制多次波已经成为一种最常用的技术，尽管这种方法有其局限性。从 20 世纪 80 年代中期引入抛物线拉冬变换压制多次波以后，没有多长时间就压倒了基于一次波与多次波时差不同原理的其它方法，如先出现的 $f-k$ 扇形滤波技术。值得注意的是，拉冬变换的迅速普及在很大程度上得益于该方法相对易于使用、很早发现了一系列窍门使其运行速度快这样一个事实。当然，新方法的效果好，这对于该技术被接受也是至关重要的。但这样的规律今天仍然存在，即新的处理技术，哪怕它的处理效果明显好，但如果计算速度太慢或使用不方便，也难于普及。

尽管有许多压制随机噪声的方法，但最重要的方法仍然是普通的叠加，今天 $f-x$ 反褶积的方法也很普及。此外，该方法是另外一个重要新进展的基础，即 $f-x$ 插值，它不用任何先验信息就可以内插出多个假频和非假频同相轴，只要单个同相轴的假频在 $f-k$ 空间不互相覆盖。十年以前我们大多数人肯定会认为这是不可能的事情。

如果不提及反褶积，那么关于数据处理的讨论就不能算是全面的。相对一二十年前，现在运用地表一致性限制条件提取反褶积算子（和振幅恢复因子）越来越普及，叠前和叠后谱白化应用更加自由，除此以外没有什么新东西广泛应用于实际生产，直到子波处理的出现。尽管有些孤立的证据说明了确定性反褶积方法的优点，但统计性反褶积仍然占优势。由此可以推论，我们的地震数据的相位在一定程度仍然不确定，无法将它与由测井资料导出的合成地震记录进行匹配。

21 世纪的地震数据处理究竟是个什么样子呢？我想相同点会多于不同点。我们没有必要去研究更多的新问题，因为我们还有许多老问题没有完全解决。我相信：从现在起二十年内，我们仍然在努力改进反褶积、静校正、多次波和噪声压制、采样和插值等等。对此我们没有理由沮丧，只要“地震资料处理中还有新东西可研究”，就没有理由失去信心。

地震成像

Samuel H. Gray 著 方伍宝译

引言

在地面记录的未经偏移的反射地震能量（例如共偏移距记录）通常可提供地下构造的强相干图像。尽管是强相干的，但该图像是不正确的，原因在于它受到几种畸变作用的影响，最显著的影响是来自地质界面截断的绕射波和倾斜界面上反射点与地面位置间能量的横向移动。地震成像就是校正这些畸变影响的地震处理手段。

在常规处理中，地震成像是众多处理手段的最终阶段。全部地震处理过程包括能量增益化、反褶积、静校正和速度分析、NMO 和 DMO、叠加，最后到主要用于构造成像的偏移。根据偏移数据体绘制地震构造图，然后在构造图上布置钻探目的层的勘探井位。这种做法一直延续至今，但是偏移后的数据已逐渐被用于后续进一步处理的输入数据。例如，当地质学家和工程师们联合攻关已做过 3D 地震工作的油田的油气开发问题时，他们把偏移后的地震数据体用作地震属性分析处理的输入数据，诸如瞬时相位或振幅随偏移距变化的处理中。通过已知井与建议井位处地震属性特征的对比，我们就能预测出建议井位处的岩性特征。例如，倘若在几口井中某一属性可能都与孔隙度观测值的相关性很好，那么这个属性就可用于估算其它井位处的孔隙度。多年来，地球物理学家都在用地震数据在比地震波长小得多的尺度上估算岩石物性特征，但直到最近他们才对偏移数据实施这种处理，它代表了偏移应用的一个全新领域。这也促使我们在偏移中要非常重视振幅这样的参数的应用。

时间和深度、叠后和叠前、2D 和 3D

地球物理学家习惯使用时间域记录的地震数据。以往，他们乐于解释时间记录，甚至是偏移后的时间记录。这就与在深度域工作的地质学家和油藏工程师产生了根本性的矛盾，同时也给许多通过设计偏移算法来摸索地球物理学规律的数学家和物理学家带来困惑。尽管深度域的解释结果明显会更正确，但迫使地球物理学家这样做会妨碍他们解释地震数据的能力，例如在资料质量差的地区，在偏移前后剖面上难以确定一一对应的反射波同相轴。所以，就有了时间域偏移（时间偏移）和深度域偏移（深度偏移），它们之间的差异远不是表面上的。通常时间偏移比深度偏移更容易实现，且已证实时间偏移对偏移速度的精度要求比深度偏移要低得多。这样，在精度要求和投入成本低的时候，我们就可以采用时间域偏移而非深度域偏移方法。另一方面，当我们试图利用偏移不仅生成地下图像，而且还要估算地层速度时，时间偏移就不如深度偏移有效了。

理想情况下，应该对采集到的全部地震道实施偏移，而且我们也正朝着这个目标快步迈进。但是，即使在几年之前，全部采集道的偏移——叠前偏移——几乎是一个梦想，很简单的原因在于成本太高难以实现。直到近来提出了一个标准的处理步骤，即在偏移前通过叠加减少数据体的大小，那就是对大量的道实施动校正和倾角时差校正，然后将这些道相加成一个以地表某一位置为参考的单道。许多道叠加成一道的处理过程模拟了这样一种试验，即用零偏移距替代多偏移距，由此获得偏移成本大为降低的数据体。多少年来的实践已经证明叠后偏移处理是很成功的，尤其是在构造适度复杂地区的成像。另一方面，我们早已认识到在一些射线弯曲严重的地区并不服从叠加处理中的假设条件，

以致地震成像质量很差。换句话说，横向速度变化很大的地区，在叠前就应该进行偏移处理。需作叠前偏移的典型例子是墨西哥湾的盐体之下的构造，由于墨西哥湾地区的速度变化极大，在叠后偏移处理出的结果中几乎见不到盐下反射同相轴。

需作叠前偏移的这些盐体还须做三维（3D）的成像。如果能采集到穿过径向形状盐丘的一条单倾向地震测线，通过二维（2D）偏移就能正确成像；但是如果未能较好地确定倾向或走向方向，则穿过沉积围岩的扭曲流状深根型盐体往往被偏移成一扁平走向的盐体。利用 2D 偏移方法时，盐下构造成像不能完全消除来自采集面以外的能量，且由于波传播到采集面之外而使得采集面内缺少成像所需的反射能量。

叠前时间或深度偏移代表了当今最新的应用水平。海上地震采集主要是 3D 采集，可以说目前开展三维叠前偏移的大多数工作量是作海洋资料偏移。与陆上采集条件正好相反，海上采集主要受地下成像目标的控制，而受海面条件限制较少。所以，我们一般对陆地数据是作 2D 成像，特别是山区数据；当地下变化剧烈时，则应作 3D 成像，因为 2D 叠前偏移不能解决问题。但采集 3D 陆上数据时，往往因为经费紧张而使得采集的数据集没有足够的覆盖次数来完成合适的静校正或速度分析。其结果是我们从陆上地震数据得到高质量成像的能力通常落后于海洋数据。

偏移方法

大多数勘探地球物理学家对偏移做什么都有所了解，且许多地球物理学家知道哪几种方法可用于偏移，但只有很少的地球物理学家熟悉偏移方法的本质特征。描述所有实用的偏移方法已超出了本文的讨论范围，所以，我们将仅介绍当今对地震数据成像有较大影响的几种代表性的方法。Gardner(1985)曾详细论述了所有这些方法；在其论著的再版卷中讨论的大多数方法为叠后偏移。叠前偏移方法远非仅仅是叠后方法的“拓展”，而且涉及到其自身概念上的重大难度。在叠前偏移中这种难度与需要处理两个波场有关（对于某个炮记录，一个波场来自炮点位置，另一个波场来自记录排列的所有检波点位置），而叠后偏移仅处理单个波场（零偏移距末偏移剖面）。

为了描述这些方法，我们需要指出支撑偏移的模型的线性性，即仅考虑一次波的声波或弹性波方程。假定没有发生多次散射（多次散射为地震能量从震源传播到一个地下绕射点，再到第二个绕射点，最后到检波器），在下面的两种方式中就可以观察到这种线性性。第一种方式是将地下看作为一组分离的散射点，而连续的反射层是由这些反射点的集合构建起来的。在这种方式下，很容易看到如果另外增加一个散射点到地下层位上，那么在未偏移记录中就会另外增加一个确定的散射同相轴。这样，在考虑散射成像时，一个时间只用一个散射点。第二种可观察到线性性的方式是将未偏移的地震记录看作为一组分离的尖脉冲信号，而连续反射同相轴则由这些脉冲的集合所构成。每一个脉冲都来自地下一个连续反射层，根据从震源到反射层的任意点再到检波点的双程旅行时等于脉冲的记录时间来确定成像位置（例如，在常速介质中，产生未偏移响应脉冲的点的集合是一个旋转的椭球，其焦点在震源和检波点位置）。增添一个尖脉冲到未偏移记录中，将导致另一个偏移“脉冲响应”被加到偏移剖面中。令人吃惊的是，波动方程提供的数学手段能消除所有偏移画弧的噪声，仅留下未扭曲的地质图像。

最熟悉或许是最容易理解的方法是 Kirchhoff 偏移。这种方法是在原有的空间—时间域内处理地震数据，且在作一些初始的滤波后，直接地实施前述两种方式的任意一种。Kirchhoff 偏移能用于时间偏移或深度偏移，且它是非常灵活的，即能够将未偏记录的任意一组采样偏移 to 偏移记录上的任意一组采样。由于 3D 叠前偏移非常之依赖于这种能力，因此在现行的多数大规模偏移中，它仍是优选的偏移方法，但这并不意味着它是叠后偏移中最精确、最快捷的方法。Kirchhoff 偏移能用于高陡倾角构造的成像，但是在三维偏移中选用足以对陡倾角构造成像的大偏移孔径时，其高昂的处理成本也是无法接受的。

在叠后偏移中仍旧流行的早期数字偏移，产生于对波动方程的有限差分近似，即只允许波场向下传播（相对于可向上、向下传播的全波动方程而言）。现有几种采用显式和隐式数值计算的有限差分偏移方法，它们的共同特点是一个完整的波场向下延拓（并不象 Kirchhoff 偏移那样选道偏移），即对单程（向下传播）波动方程采用有限差分近似，波从记录面穿过一个中间厚度层再到成像深度点。这些方法能在时间域或深度域中实施。当倾角适度时，这些方法相当精确，但当倾角很陡时则就不那么精确了。

最快捷的偏移方法是在 $f-k$ （频率—波数）域运行的。这些方法将记录波场分解成平面波分量，并分别偏移每个分量。象有限差分法一样， $f-k$ 方法也是从记录面到成像深度向下延拓波场。这些方法对波动方程不采用有限差分近似，而是采用相移法实现向下延拓。即使在倾角很陡的情况下这些方法也很精确，但是它们不能很好地适合横向速度变化很大的情况。而将其扩展到适应横向速度变化情况是可能的，但此时则不再是最快而变成了最慢的方法之一。

最后，一种采用全波场双程波动方程的偏移方法称作逆时偏移。从记录到的波场开始，将某个时间的切片逆时传播进入地下，即依据波动方程，波场从切片时间点反向传播。通过这种方式，逆时偏移构筑了地球内部每个时间步的完整波场，以至于我们能看到能量快照从记录面向反射点移动。相对其它方法而言，逆时偏移对地震波传播方程的近似较少，因而它是现有最精确的偏移方法。很遗憾的是，通常它也是最慢的方法。然而，它已经成功地用作为标定其它偏移技术的概念模型，以及作为具有很好速度控制情况下极度复杂地区的最终偏移手段。

我们看到似乎有太多的偏移方法。为什么有如此之多的方法呢？在这里我们仅介绍了其中的几种，此外还有其它许多常用的方法。如此多的偏移方法在迷惑了许多地球物理学家的同时，也已证实为解决我们遇到的各种成像问题时是很有用的。一些方法适合于高陡倾角复杂地质构造的成像，而其它方法更适用于低成本的高分辨率地层成像。由于 Kirchhoff 偏移的灵活性，它适合于处理很多问题，但是对于许多偏移问题来说，它既不是最快也不是最精确的方法。我们可能会提出这样的问题：“为什么有如此之多的偏移方法？”或换句方式问“较少的方法是否会更好些呢？”考虑到我们面对着大型成像项目的高额经费投入，和由于成像失败而导致干井的巨大资金浪费，对第二个问题的回答必须是强有力的“不！”

速度估计

为了实现地震数据的成像，偏移处理需要已知从震源和检波点到地下位置的旅行时，而要确定旅行时就需要速度。通常时间偏移是利用地面位置和成像位置间的一种平均负载速度，也可称之为成像速度；而深度偏移则是利用一种更详尽的层速度函数。对于叠后偏移，这些函数通常完全能够从叠加速度分析得到的速度可靠地估计出来。对于叠前偏移就不能采用叠加速度了，而必须利用其偏移处理本身来估算速度。对于这种处理，深度偏移比时间偏移难度要大得多。已经提出了几种用于叠前深度偏移的层速度估算方法。这些方法的最简单方式是在每个水平位置按垂直方向修改速度，即假定某个地下位置的偏移后数据仅与其位置正上方的速度有关。常用的最完善的速度估计技术为地震层析成像，即在每个成像位置求偏移后记录间的代数最小误差。象偏移方法一样，每种求取速度的方法都有其用途，即简单的方法适合于弱至适度横向速度变化的地区。然而，没有一种方法能非常适合于数据质量差和速度剧烈变化的地区，而恰恰我们最需要很适应这些复杂地区的速度估算方法。

面向未来

地震成像比其它大多数地震处理的计算量要大得多，故它一直紧随着计算机硬件技

术的发展而进步。至今我们仍在对大量的叠后数据作偏移，这就意味着叠前偏移的计算成本仍然太高，因而我们还需要具有更大内存和更快磁盘存取的高速计算机来降低处理成本。然而，我们已经从在特制的阵列计算机上运行 2D 叠后偏移就需要花费数天的时代前进了一大步；我们永远告别了第一代偏移，那时的偏移是用量尺和罗盘来机械地实现的。

过去几年里，地震成像已在主体标量计算机、向量阵列处理机、向量超级计算机、并行超级计算机和工作站上运行和应用。再过几年，我们将会看到在个人计算机上完成的偏移处理工作量将与日俱增，甚至可作大规模的 3D 叠前偏移，因为现在的个人计算机具有 10 年前超级计算机的运行速度，且内存更大得多。偏移处理能力的提高应促使我们更有效地解决偏移速度的估算问题（常常为各向异性），以避免因偏移迭代次数多而增加成本。随着偏移处理能力的提高和速度估算技术的改进，3D 叠前偏移将由几乎不可能实现的王国（10 年前）过渡到常规处理王国（几年后）。

正如前文所述，地震偏移成像正逐渐被用作后续处理的输入数据，即用其估算 3D 数据体中基于地震属性的岩石性质。随着对这项技术的进一步了解，我们就会意识到成像方法中保持地震振幅的重要性。这将使我们既能分析诸如反射系数随偏移距变化这类的简单属性，又能分析比现在更可靠、更复杂的新属性参数。

可以预计，弹性波成像的应用将会与日俱增。朝这一方向努力的第一步是实现转换波成像。有关的工作已获得了一些成功，例如在那些 P 波记录上很模糊的气云区中用转换波数据成像获得了成功，但我们还需要开发满足全波动方程的矢量波场方法。未来必将证实，当今最慢的声波（单分量）偏移方法——逆时偏移，将成为矢量波场成像的最简单、最快速的方法。

地球物理反演的过去、现在和未来

Sven Treitel 等著 高林译

引 言

自从我们这个行业诞生以来，地球物理学家就一直致力于求解反演问题。在地球物理勘探中，解释人员总是基于地面观测数据如地震记录或势场记录来推断地下特性。他们事先在头脑中形成一个粗糙的反映地面记录形成过程的模型，解释时通过这个粗糙的模型根据实际观测到的地面记录重构地下特性。按现代的说法，这种根据观测数据推断地下特性的工作就是求解所谓的“反演问题”。相反，“正演问题”就是在给定地下特征和特定的物理定律成立的前提下确定所能记录到的数据。直到 20 世纪 60 年代初地球物理反演才真正在地球物理学家的头脑中扎下了根。从那时开始，人们就尝试开展定量的和通用的地球物理反演，所采取的方法是一方面求助于理论的扩展，另一方面借助于计算机的能力将这些理论付诸实际应用。应该指出，理论和计算机算法无论如何不可能替代最终裁决人——地球物理解释人员来决定最终反演结果是否有意义。或许我们的子孙后代在写第 22 世纪的评论文章时会谈到机器在没有人的干预下已经解决了反演问题。但就目前而言，所谓的“无监督地球物理反演”仍然是一个梦。

按照上述很广义的反演问题定义，我们在处理中心应用的那些熟悉的算法都可以看作地球物理数据的转换程序。例如，地震偏移就是试图根据地震记录重建实际的地下地层形态（Gardner, 1985）。地层反射系数的反演可以通过预测反褶积衰减多次波反射来实现（Peacock 和 Treitel, 1969），或通过地层脉冲响应中一次波和多次波的模拟来实现（Lines 和 Treitel, 1984）。振幅随偏移距的变化（AVO）（Castagna 和 Backus, 1993）处理包括地面振幅测量结果的岩性反演等等。反演能处理不同类型的地球物理数据。由此，人们能够将不同的地球物理数据集（诸如地震、势场和井中数据）与同一个地层模型同步地或顺序地进行拟合（如 Lines 等，1988）。其它反演的例子很多，不胜枚举。在每一种情况下，我们都假定物理定律是成立的。例如，在地震反演中这个定律就是波动方程或是其某种近似。这样，基于物理定律的算法就使我们能够将观测到的数据转换成地下特征，这些特征都曾在其特定的位置上对观测结果产生过影响。

我们这里讨论的是很广义的反演定义，不会与一般文献雷同，尤其不会与勘探地球物理文献重复。概述了反演方法的理论背景后，我们再讨论一些勘探地球物理中更为流行的方法，它们通常被确定为“反演方法”，然而，需要重申的是，这些确定常常是模糊的，实际上我们的日常工作很多都与地球物理反演有关。

理论背景

反演可以定义为一种方法，借助于这种方法，人们可以获得精确描述所观测到的数据集的地下模型。以地球物理数据为例，我们的观测结果包括那些可称之为地下构造的物理特征信号，即由地震震源或电磁源激发产生的构造反射（或散射）波场，或构造异常重力场或磁场等。有关现代反演方法的理论基础在 Backus 和 Gilbert 的早期（1967，1968，1970）著作中可以找到。

反演处理与正演模拟密切相关。正演模拟利用数学关系如波动方程来合成地层模型的激发响应，例如地震能量脉冲。地层模型是由一组参数如层速度和层密度等来定义的。这里，如何选择能精确描述观测结果的正演模拟方法肯定是非常重要的。在地震勘探中，

正演模拟是用一种生成合成地震记录的算法来实现的，这些算法有地震射线追踪法、有限差分法或有限元波动方程解法等。在重力勘探中，正演模拟方法包括根据假定的地下密度分布计算重力场的规则。除了选择合适的数学模型外，了解应该使用多少模型参数和哪些参数最有效也是很重要的。“正确”模型的选择取决于所面对的勘探问题。例如，水平层状模型可能对堪萨斯中部的地质情况合适，但肯定不适用于怀俄明逆掩断层带和阿尔伯特山前带。

反演或“反演模拟”试图根据给定的一组地球物理测量结果重建地下特征，重建工作以模型响应“拟合”测量结果的方式进行，拟合工作通过某种误差测量方法来完成。因此，选择“好”模型是至关重要的。但即使模型选择得很充分，仍然有大量的问题需要解决。事实上，Jackson (1972) 曾将反演中肯地描述为“对不精确、不充分和不一致的数据进行的解释”。

在回答这方面的一些问题中，采用符号注释可能更方便些。我们将正演模拟过程表示为变换 $f=T(x)$ ，这里 f 是模型响应， x 是一个包含地下模型参数集的矢量， T 是某种线性或非线性变换，我们假定它能以数学方法描述某种被观察的物理过程。在地震勘探中， T 以合成地震记录的形式产生一个模型响应。这样，反演方法可以被写成 $x' = T^{-1}(y)$ ，式中 x' 现在是一个包含由数据矢量 y (数据空间) 导出的地下模型参数集 (模型空间) 的矢量。这样，算子 T^{-1} 就表示从数据空间到模型空间的逆变换。

尽管模型选择 (或 T 的选择) 在物理上是有意义的，但仍存在大量的问题。首先， T^{-1} 或许是不可确定的。其次，所要求的数据可能有“盲点”，例如，地震震源可能没照射到地下给定的部分，因此根据记录数据没有办法重建该部分。此外，实际数据总会受到噪声的污染，除理论情况外，可以预料在给定的测量误差范围内将有不只一个地下模型满足所观测到的数据，换句话说，反演是非唯一的。对这些问题理论研究人员已经做过大量的研究工作，用他们的话说，反演问题是“不适定的”，即解矢量 x' 中的微小变动就能在模型响应 f 中产生很大的变动；观测数据 y 中微小的变动就能在解矢量 x' 中产生很大的变动。

人们尝试用合适的最优化算法进行观测地球物理响应与理论地球物理响应的匹配。设计这些算法的目的是使观测数据与计算数据之间的某种差异测量达到最小。大多数方案都是首先对模型参数作初始估计，据此可计算出初始模型响应。然后，用最优化算法产生一组调节或修正参数的估计值；接下来将这些修正参数“插入”理论模型，由此得到的新理论响应应该 (有充分希望) 改善数据的匹配。如果情况是这样，就说明反演是收敛的；否则，尽管已知的方法总是无效的，但有大量的替代方法来达到收敛的目的。因为模型响应通常是模型参数的非线性函数，所以有必要以迭代的方式完成这些运算；这就是说必须多次重复执行上述过程，直到理论响应和记录到的地震响应之间的吻合程度满意为止。

这两种响应之间的良好匹配为我们提供的是使运算收敛于地下实际情况的必要条件而不是充分条件。如前所述，我们获得的解是非唯一的。事实上，可以证明，在规定的误差范围内，有一系列的解满足这些数据 (Cary 和 Chapman, 1988)。幸运的是，我们能够约束这些解，使之向地下参数的先验知识靠近。这类约束可能是“硬的” (如，在某一上、下层面之间密度和速度是确定的)，也可能是“软的”，可以用多维概率密度函数的形式表达出来，这里，概率密度函数的维数等于描述给定模型参数的个数。描述模型参数先验知识 (或偏见) 的先验概率密度可以与所谓的“似然率函数”结合使用，似然率函数主要依赖于模型响应与观测数据之间的失配。高斯曲线 (钟形) 是先验概率密度函数的简单的一维例子，其峰值对应于给定模型参数的最可能值，其宽度是对该模型参数可能值范围的先验估计结果的量度。这样我们就获得了给定反演问题的解的所谓后验概率密度分布。最后得到的多维后验概率分布的峰 (可能是多峰) 将揭示模型参数值的最可能分布。这些值转过来又应该在给定误差范围内产生满足观察数据的模型响应。

Tarantola (1987) 就是这种反演哲学的早期提倡者之一。他的思想是在英国教士和统计学家 Thomas Bayes (1733) 的经典著作的基础上产生的。更新的文献将该方法称为“Bayesian 反演”。有关这方面的深入探讨参见 Duijndam(1988a,b), Gouveia 和 Scales(1997,1998)的文章。Scales 和 Snieder1997 年发表的一篇文章已对 Bayesian 反演的更广泛的含义作了深入的探讨。可以说, Bayesian 反演在勘探地球物理界已经获得了广泛的应用, 其未来前景会更加广阔。

反演计算的结果既取决于正演模型(其响应应该与观测数据相匹配)的选择, 同时也取决于合适的最小化误差原则的选择。常规的方法是建立在累积最小平方误差(LSE)和累积最小绝对偏差(LAD)的基础上的。除误差标准的选择之外, 通常也可采用光滑约束来避免解向量中的虚假振荡(Constable 等, 1987)。

一般情况下, (广义)非线性问题是用给定最优化算法的迭代使用来求解的。问题是为了达到收敛于“正确”地下模型的目的, 初始推测必须“接近”实际情况。更为常见的是, 在分辨率与噪声抑制之间存在一种折衷: 只有以降低噪声抑制效果为代价才能获得较高分辨率的解, 反之亦然(Jackson,1972;Treitel 和 Lines,1982)。换句话说, 我们总是在解的分辨能力与其响应拟合观测数据的能力之间寻求一个折衷。所以, 目前已有不少人以极大的兴趣开发所谓的“全局优化”算法, 这种算法起码在理论上能够产生使其响应与观测数据拟合得很好的模型。在这些方法中我们特别提一下遗传算法和模拟退火法(Smith 等,1992;Sen 和 Stoffa,1995), 以及蒙特卡罗搜索法(Cary 和 Chapman,1988)。近些年来, 人们用人工神经网络求解反演问题的兴趣也在不断增加(Calderon-Macias 等, 1998)。

勘探地球物理中一些流行的老反演方法

大量地震数据的处理都是以一维水平层状介质模型为基础的, 即基于局部地质情况可以用一叠水平均匀平行地层(各层具有特定的密度、速度和厚度)来近似表达的前提。这种简单的地质模型允许人们用 Dix 公式根据观测到的地震反射时间和已知的震源、接收器位置来估算层速度。换句话说, 就是通过确定(根据观测到的旅行时)层速度用 Dix 公式求解地球物理反问题。Dix 方法一直被广泛应用至今的事实说明了简单 1D 地下模型的能力和通用性。

水平层状介质模型还形成了我们所熟悉的共中心点(CMP)叠加方法的基础, 在 CMP 叠加中, 对分享同一炮检中点的一些地震道进行正常时差校正求和, 产生一个逼近 1D 层状介质垂直入射平面波响应的求和道。本着这种数据, 形成了一种由介质反射系数(即地下垂直入射反射系数序列)与震源子波褶积给出的地震道模型, 这在勘探地球物理界广为流行且获得了极大的成功。在这种情况下, 1D 反演方法的目标就是从 CMP 道中恢复反射系数的估计值, 以及地层厚度和各个界面上的阻抗差。

层状介质垂直入射反射系数的估计几乎都是以 Goupillaud 模型(Goupillaud, 1961)为基础的。这种模型包括一个所有地层都具有相等双程旅行时的分层体系。后来, Kunetz (1964) 用 Goupillaud 模型提出了一种反演方法, 根据层状介质脉冲合成地震记录产生了反射系数估计值。不幸的是, 这种方法在实践中被证明是相当不稳定的, 实际上, 它是大多数反演问题解法中固有的不适定性的早期受害者。在当前的实践中, 反射系数估计值是用更复杂的反演算法获得的。首先, 人们对野外叠加地震道进行去混响处理, 以衰减多次反射能量, 然后进行信号反褶积, 以获得垂直入射反射系数。在这个过程达到卓有成效的程度后, 由 Lindseth (1972, 1979), Laverne 和 Willm (1977) 提出的阻抗估计技术接着流行起来, 变成了常规地震道反演方法。Lindseth 将这个办法命名为“Seislog”(拟测井), 因为它能由观测到的 CMP 道产生连续的速度测井估计值。Oldenburg 等 (1983) 曾对“块状”或参数型拟测井做过介绍。实际上, 对于许多应用地球物理学

家来说,拟测井方法与地震反演是同义的。但正如我们已经指出的那样,事实并非如此,因为实际地震数据是有限带宽的和含有噪声的,而拟测井往往打破了这些限制。但有趣的是它的确也获得了许多成功。

勘探地球物理中一些新的反演方法

过去几十年中,反演理论在全球地球物理界获得了广泛成功的应用。但我们自己的勘探地球物理领域对这些新技术的接受和应用还是不如人愿的。如果将地震偏移看作地球物理反演理论的一个组成部分(尽管它应该是!)的话,那么这种说法显然是错误的。除地震偏移方法外,我们还要讨论地震旅行时反演(通常称为地震旅行时层析成像)和地震全波形反演等新方法。在旅行时反演中,人们对一组观测(拾取)旅行时与由一合适的正演模拟算法获得的旅行时进行迭代拟合,直到两者之间的一致性达到满意的程度为止。用于这种旅行时计算的正演模拟算法主要是2D或3D射线追踪方法。目前这些算法有声波和弹性波两种形式,它们也能用来处理地震各向异性问题。业已发现,旅行时层析成像在井间地震测量中能发挥重要的作用,如果在井间对某些给定的地层进行重复测量,就能动态监测两口或多口井间的透射速度层析图像,从而显示连井平面上的介质速度的详细变化。这些层析图像是所谓“时延”或4D储层监测的一个重要组成部分。旅行时反射层析成像还与地震偏移方法广泛地结合运用,以获得地震偏移速度的迭代估计结果。

全波形反演显而易见是旅行时反演的推广。这里,不是将观测的拾取旅行时与计算旅行时相拟合,而是将全波形合成地震图像与全波形记录数据相拟合,无需进行旅行时反演情况下冗长的单个同相轴拾取。对于实际问题,全波形反演的运算量即使对现代计算机而言也显得过分庞大,这项激动人心的技术还得在勘探地球物理领域寻找日常的用途。Gouveia和Scales最近(1997,1998)的研究清楚地表明,运算方面的障碍一经克服,全波形反演将会达到令人满意的结果。然而,将给定模型响应与数据的噪声分量相拟合是危险的,这是全波形反演所面临的困难之一。尽管这对所有的反演方案都是一个问题,但对全波形反演尤为严重(见Cary和Chapman的文章)。

至此,反演的含义就是,用一个正演模型(选择来模拟生成记录的特定物理过程)对各地球物理数据集进行转换。如此,重力模拟算法可能生成一个与一组实测重力读数相匹配的合成重力场,地震波传播模拟器同样可以生成一套与一组地震野外数据道相匹配的合成地震记录,等等。很显然,反演就是对地球物理数据集进行转换,以获得额外的地下信息。问题是对多种地球物理数据的转换是联合进行好还是顺序进行好。在前一种情况下,地震数据和重力数据被同步拟合到其相对应的数据集;在后一种情况下,将从初始地震反演计算得到的构造信息作为确定重力场的构造模拟的输入,依此类推。在联合反演情况下一个重大的不可解问题是要给予各个数据集以相对的权数,目前尚无实现这一目标的客观方法。因此,这种权数选择必然带有很大的主观随意性。Lines等(1988)曾对这个问题进行过较为详细的讨论,并对两种方法进行了举例说明。

展望未来

前面,我们阐明了现行地球物理处理技术中大多数都可以看成是解普遍存在的反演问题的尝试:我们有地球物理数据,我们有这些数据产生过程的抽象模型,进而,我们寻求能够对模型参数进行转换的算法。随着地球物理处理技术的不断发展,反演方法在理论和运算方面的问题将显得更为重要。在当今勘探工业界,迭代地球物理反演尚未得到广泛使用,其原因是计算资源很少能满足这一要求。就象3D叠前深度偏移今天终于成为经济可行的方法一样,上述新的反演算法走向繁荣的日子也为期不远了,它们将使

地球物理学家不仅能够将观察结果转换成地下的构造形态，而且能够更详细地了解地下的物理、化学和地质特征。这些新技术获得广泛应用之日也就是地球物理反演理论在矿产和石油勘探中大放光彩之时。

油藏地球物理

Wayne D. Pennington 著 严建文译

引言

油藏地球物理是一个相对较新的概念。过去，地球物理的角色大多局限于勘探，而在油藏的开发中应用程度则很低。随着效益成为油气工业经济发展的主要动力，随着一些主要油气田的枯竭，人们越来越认识到，地球物理是一种可以用来降低油气开发成本的手段。地球物理测量特别是地震测量的可靠性，极大地降低了现有油田与钻井有关的风险，把地球物理约束条件加到统计模型中去的能力，提供了一种直接向油藏工程师传送地球物理结果的机制。油藏地球物理研究的几个好的例子可参见 Sheriff(1992)以及 The Leading EDGE 杂志开发和生产专辑（如 1999 年第三期和 2000 年第三期专辑）。

勘探和油藏地球物理之间的区别

勘探地球物理和油藏地球物理之间有着一些特殊的区别，术语通常是明确规定的。这些区别包括如下假设前提，即在地球物理测量区域内有适用的井控制资料，能够进行精细程度的（也将是有用的）地球物理测量设计，具有解释所需求的岩石物理数据。

井控制

勘探中，我们通常要向远离目标区带，横穿断层，层序边界，和偶发性不连续点的地方外推井数据。“类比”的有效性是勘探的一个重要方面，而且解释结果的置信度水平必定是有限的。油藏地球物理中，一般假设油藏已经生产了（或者至少开发了一段时间），而且在分析时有井资料可以加以利用。这些井资料提供了各种不同的信息。从岩石物理学家那里，我们获得了经过编辑和解释过的测井数据、岩性描述结果（包括矿物学、孔隙度甚至岩心空间的形态）、流体含量（有时与测井条件有关，有时与原始油藏条件有关），以及详细的地质层位的深度约束条件。从生产和油藏工程师那里，我们接受到边界、含水层或其它目标特征的近似估算结果。油藏工程师还能提供油藏总体积的理想估算结果，综合研究队将其与地质解释联系起来，确定提高分辨率所必须的测量方案。综合各种数据来源，我们获得关于油藏的现场条件下的许多信息，包括地层温度、压力、油气和盐水的特性。地球物理学家必须熟悉岩石物理和油藏工程研究的作用和局限性，并且能够提出有关这些领域的一些专家级的问题，但地球物理学家不必成为这些领域的专家，而是与其它专家一起协同工作，以设计出解决油藏问题的试验新方案。

Van Dyke(1997)详细介绍了油藏开发和油藏工程实践方面的内容，即使对此技术不了解的地球物理学家对他的介绍也易于接受，Craft 和 Hawkins (1991, 修订本)出版了关于油藏工程的经典著作。其它被地球物理学家所重视的石油工程的书籍包括 Dake(1978), Jahn 等 (1998) 和 Cosse(1993)等出版的著作。关于石油工程的详细参考文献有 Bradley(1987)出版的著作。关于测井和地层评价的理想参考文献包括 Dewwan(1983)和 Asquith(1982)。

岩石物理控制

地球物理学家所要回答的主要问题之一或必须独立地回答的问题是：地球物理技术能否区分出什么样的油藏模型具有更好的效益和较低的成本？回答不仅仅取决于地球物

理模型，也取决于油藏岩石和相邻地层的岩石物理——或者说“地震岩石物理”（Penning, 1997）。井的存在和获得岩心样品的可能性都极大地提高了油藏地球物理学家解决问题的能力。测井，特别是与成像测井相结合的纵、横波速度测井，为我们提供了裂隙的信息，它可以被用来（仔细地）为我们提供一些基本的地震特性，这些地震特性可被依次用来模拟变化的岩性特性，流体含量以及现场条件（如孔隙压力）。岩心样品可被用来提供理论框架的基础，或者说它们的测量结果可被用来（再一次，仔细地）提供同样是基础性的地震特性。地球物理学家必须时常注意与标度特性有关的输入数据的意外错误，特别是在某一尺度（如高频处饱和岩石的喷流机制）观测到的物理效应不能被错误地应用于其它尺度处。有时，了解不够可能是一种很危险的方法，地层的地震岩石物理方面不完善的评价会导致不正确的结果或解释（见 Dvorkin 等，1999）。

关于岩石物理和地震响应的一些基础性文章参见 Nur 和 Wang(1989)和 Wang 和 Nur(1992)；Mavko 等（1998）发表了关于岩石物理公式的摘要及其应用。

测量设计

一旦某一油田已被发现、开发并生产了一段时间，地球物理学家就可以获得一些有关信息来设计一个以最大似然方式开展地球物理测量的方案，采集的数据将使解释最佳化。也就是说，如果测量的目的是为了确定油田的构造边界，那么，3D 地震测量就可以以这种想法来设计。然而，如果测量的目的是为了确定气区的范围，地球物理学家可以利用测井资料、地震岩石物理模拟和以前的地震资料来确定区分水区和气区所要求的偏移距范围。如果需要更高精度的连井或子波相位控制，可以设计相应的 VSP 测量。或者如果在以前采集的地震数据上观察到采集的痕迹，而且这些采集的痕迹模糊了用于确定油藏目标的属性，那么地球物理学家可以设计新的测量来消除这些麻烦的人为因素。简单地说，就是目标体是已知的，它使得油藏地球物理学家要比传统的勘探地球物理学家在设计测量方案时具有更多的优势，而且是以目的更为明确的方式来设计测量方案。通常很容易证明适当地开展用于储层特征描述的地震测量的花费是合算的，这是因为可以以更高的置信度来计算测量的经济回报率，而且其资金成本回笼要比传统的勘探地震测量快得多。

过去的几年里，关于 3D 地震测量设计的方法变化很快，Evans(1997)、Stone(1994)和 Liner（1999）在他们出版的书中都对其作了较好的介绍。最近的一些研究表明，地震资料、井控资料、VSP 结果和生产信息的综合具有明显的效果，见 Hardage 等（1994, 1996, 1999）。

3D 地震

虽有许多各种各样的其它技术常被用于一些特定的项目，但绝大多数油藏地球物理都是基于反射地震数据的。尽管几乎所有用于油藏研究而采集的地震数据都是高覆盖次数的，而且是以垂向检波器采集的 3D 数据，但是，在陆上和在海底以多分量震源激发、多分量检波器接收的转换波数据的应用正不断增长。特别是，为了对气云下方进行成像（油藏的 P 波成像不清楚），转换波的应用正在加强，而且获得海底多分量数据的技术正不断得到改进。在许多油藏开发方案中，裂缝的重要性已经产生了大量关于多分量震源和检波器的经验做法，通过横波分裂（和其它特征）的识别来确定与其有关的高裂缝密度。其中有些技术的应用可望在未来得到持续不断的增长，但目前来说，设计用来描述现有油藏的绝大多数地面地震研究是用垂直分量检波器接收的高质量 3D 地震测量。

应用 3D 地震数据进行油藏开发的许多好的实例可参见 Weimer 和 Davis(1996)的文集，应用 3D 地震数据进行非常规油藏特征描述的实例参见 MacBeth 和 Li(1991)以及 Lynn 等（1999）的文章。Thomsen 等（1997）给出了劣质数据区（气囱的结果）海底测量中转换波应用的最新实例。

属性

在大多数勘探和油藏地震测量中，主要目的是为了在时间和深度域正确地进行构造成像，以及在叠后和叠前域正确地描述反射波振幅。从这些数据中，可以获得许多附加的特征，并且将其用于地震解释。总体来说，这些特征被称作为地震属性(Taner 等 1979)。最简单同时又是应用最广泛的属性是地震振幅，它通常被称作为沿从 3D 数据体中拾取的某一层位共中心点(CMP)处的最大(正的或负的)振幅值。幸运的是，在许多情况下，反射振幅直接对应了下伏地层的孔隙度，或者可能对应了该地层孔隙空间所含流体的密度(和可压缩性)。在这种情形下，假设振幅与 R_0 成比例，而简单的褶积模型通常是适用于数据的解释的。但并不总是这样简单，在这种假设条件下会发生许多解释错误。举个例子来说，许多情况下，褶积模型可能并不适用，特别是如果在解释中反射与偏移距的关系很重要时更是如此。而且把孔隙度或流体特性的变化解释为真实阻抗变化的原因又过于乐观，特别是在含粘土的砂岩或具有裂隙的岩石中。

除简单的振幅应用外还有许多其它地震属性可以利用。许多“原始”地震属性是基于 Hilbert 变换的，包括了瞬时振幅(或波包络的振幅)、瞬时相位(大多用于精确时间拾取)和瞬时频率(常常与薄层混响有关，但经常可能错误地解释为由于气泡引起的衰减的结果)。由这些属性引伸出的许多其它的属性也可加以利用。例如，相干性是相邻地震道之间波型相似性的属性，它常常被用来识别裂缝(Marfurt 等, 1998)。倾角和方位角描述了最大相似性时地震道偏移距的方向，它们能输出地层界面的理想的详细图像。如今，在地球物理处理或解释软件包中所利用的属性超过了 200 个(Chen 和 Sidney, 1997)；从稍有不同的各种方法中获得的许多地震属性实际上定义了同一个特定的属性，如频率或振幅。在薄地层地区应用传统的属性分析时必须特别小心，因为这些地区薄层本身的干涉可能会模糊传统的属性解释(详细内容见本文中“超薄地层”一节)。

井标定

由于有许多属性可供选择，因此油藏地球物理学家必须仔细地应用测井资料、岩心资料以及有效的井中地震信息对地震资料进行井标定，以便研究地震属性和岩石特性之间的关系。而且，油藏地球物理学家比勘探地球物理学家享有更为明显的优势，勘探地球物理学家并不总是能把地震数据及其特性(属性)与经井资料证实的地层特性联系起来。油藏地球物理学家对综合研究队内可获得的专门知识以及所有信息的利用是很重要的，否则就会失去开展油藏地球物理研究的优势。建立起目的层的属性和目的层测井数据(或由测井推导出的数据)之间的关系是很简单的，可以说地震振幅和孔隙度之间的强相关性常常足以使许多研究人员确信这种相关性是很有意义的，于是地震振幅可被用于油藏特征描述中孔隙度的表示。但正如人们可能的许多推测那样，该方法中又存在许多潜在的缺陷(Kalkomey, 1997; Hirsche 等, 1998)。必须对合适的相关性进行统计测试，也必须引入地质结论对结果的合理性进行检验，最为重要的是观测到的属性特征要有其物理基础。

地质统计

在油藏特征描述中，综合研究队通常都有大量的井资料可资利用，一般来说，研究人员根据它们来推断油藏。根据这些井资料的可利用性会有下面的二难推论：你如何利用现有数据的空间分布？很容易看出井之间简单求平均会导致使人误解的结果，当可被观察的特性相关超过某一确定的距离时，人们开发了一种可以利用的称作 Kriging 的技术。该技术已经得到了改善，它包括下面这样一种数据的利用，即该数据能提供位于井位处“硬”数据之间额外的“软”证据，地震数据经常提供这种“软”证据。实质上，如果发现井中观测到的地层参数与研究区域内观测到的地震属性之间存在一个统计上

(和物理意义上)的相关性,则可以利用地质统计技术来建立井口处硬数据的“信用度”,并且在井之间进行内插(一般用 Kriging 技术),同时也使地震解释可以更深入或浅出一些。在没有地震数据的情况下,利用先进的地质统计技术能生成井间范围可能的各种“认识”,产生的每一种认识似乎都有其合理的相似性。但在存在具有可靠预测能力的地震数据时,这类模型的应用范围会大大缩小。尽管相关性不太理想,而且通常要考虑到许多相似性模型,但地质统计技术终究使油藏特征描述问题降低了随机性和提高了确定性。

关于地质统计方法的文献很多,包括 Dubrule(1998)、Jensen 等(1997)以及 Isaaks 和 Srivastava(1989)的文章,Yarus 和 Chambers(1995)发表的文献汇集了许多史例。

超薄地层

近年来人们开发出了几项特殊的技术,这些技术显然有助于解释人员识别非常薄的地层的特征,这种情况下所考虑的地震数据分辨率都显著小于传统的四分之一波长。这些技术利用了有限带宽地震子波内各种频率分量,既有频率域方法,也有在时间域实现的方法。

频率域谱分解方法(例见 Partyka 等,1999)可望切分出频带内来自薄层顶底反射干涉中的一种虚反射信号。虚反射处的频率或谱陷频对应于薄层的二倍(双程)时间厚度。由于地震子波包括了许多高于主频的频率,因此,谱陷频可以显示很薄地层。例如,河道或海岸线的变细,可通过频谱中较高频率陷频位置的成功填图来观察到。

时间域方法包括匹配子波特征,通常利用神经网络技术(Poupon 等,1999);沿某一给定层位的子波可被分类成几个不同的子波,也许彼此之间仅仅存在比较细微的差别。分类子波的结果图常常能类推出所求取地质特征的图像。分类有助于比较相对振幅(如旁瓣与主瓣),例如,主峰或主槽的“肩峰”,或周期内的微小变化,因此常常与子波分辨率之下地质特征造成的干涉相对应。

如果地震岩石物理模拟不进行直接地震分析和解释或不进行结果证实,所有这些技术可计算出导致不正确解释结果的风险。对于油藏地球物理学家来说,将高级计算机软件用作黑盒子来提供完美的图像正越来越成为一件很容易的事,这就使得解释中的可靠性值得怀疑。幸运的是,目前所能获得的绝大多数软件包都包括了结果测试所要求的模拟性能,当然测试仅仅是在油藏地球物理学家能够应用它们时才能实现。

聚焦方法

由于油藏地球物理学家对目的层已进行了分析研究,对以前的地震数据已进行了井标定,并且研究了油藏内各种预期情况的地震岩石物理响应,因此,他们有机会搜集到这些数据,而且也只有利用这些数据才能观察目的层的特征。例如,如果人们确信远偏移距地震数据包含了研究所需的所有基本信息,那么可以只搜集远偏地震数据(Houston 和 Kinsland, 1998)。然而,可能由于即使增加成本也不能保证降低缺失重要数据类所带来风险的原因,因此这种高度聚焦方法的应用效果并不是很明显。也许人们对有目的地收集某种数据有一种自然的厌恶,这种数据也不象常规采集的地震数据那样“美好”或“完整”,即使该方法是科学方法与工程实用主义的完美结合。

井中地球物理

油藏地球物理学家不仅具有应用井数据建立相关性的优势,而且还具有把这些井数据推广应用到新的地球物理数据收集中的有利条件,这些数据受地面噪声和风化层的影响很少,而且本身更接近于目的层。许多新的井中数据采集技术是有效的,而且许多技术在不远的将来可能成为油藏地球物理学家方法库里一种重要的技术。地震震源和/或检波器可以安置在一口井中或相邻的井中,或者在地面上,分析的对象可以是速度场也

可以是井附近详细的反射图像。既然是井中地球物理，因此至少应将震源或检波器安置在井中，除此之外，几乎所有能被成像的几何排列都已进行过测试或经过认真考虑。

V S P、校验炮、声波测井和套管井声波测井

常规的井中地球物理技术包括V S P、校验炮测量、传统的声波测井和套管井声波测井。起初，开发所有这些技术是为了建立起地面地震和井中观测结果之间的联系，但现在它们已被推广应用到许多情况。V S P为详细的同相轴识别和子波确定(包括相位)提供了最佳数据，但它们也可被用来对井附近环境进行成像，而且如果对震源位置应用多种偏移距形式，那么这些图像可得到进一步的改进。现代声波测井方法提供纵、横波速度的理想测量结果，它们是标定研究地震数据上流体置换效应所必需的；当然，如果数据显示出侵入或非侵入状态，解释人员必须仔细地了解情况，而且必须根据情况作近似校正。现代声波测井方法还常常能提供套管井可靠的速度值，它通常能发现套管后面的软泥岩的可靠形状，这是因为裸眼井中泥岩是流动的或塌陷的，因此裸眼井测井不具有这个能力。

井间、RVSP和单井成像

井中地球物理技术的最新发展包括将地震震源安置在一口井中，接收器在另一口井中(井间地震)安置在地面(逆V S P(RVSP))，或以距震源一定的距离安置在同一口井中(单井成像)。实验中，利用这种布置采集了数据并已生成了图像，此外还获得了数据采集、处理所需要的时间以及整个作业的成本，综合这些因素可以考虑在什么地方可以将这项技术进行商业性作业，而不仅仅是实验。几年前，井间地震技术仅仅是用于层析成像，同时提供井间范围速度的有效描述，而不提供详细的图像。近来，层析成像技术常常被用来提供二井间(以及下方)生成高度详细反射图像所需的速度信息(Lazaratos等, 1995)。RVSP数据的利用只是近来才成为现实，但早期的一些研究表明，这项技术在井附近详细构造成像中的潜力是巨大的(Paulsson等, 1997)。单井成像(Hornby等, 1992)尽管还没有普及，但对于详细的特殊构造的研究来说，它是一种有用的方法，诸如盐丘侧翼研究，它有助于从某一勘探井进行开发侧钻的设计，尤其是在深水环境。

无源地震监测

近年来，人们对油藏围岩的机械响应进行了详细研究，Teufel和Rhett(1992)报道了在北海Ekofisk台地观测到的引人注目的沉降，尽管关于天然地震与油气生产(Kovach, 1974; Pennington等, 1986; Segall, 1989; McGarr, 1991)和注入实践(Raleigh等, 1976; Davis和Pennington, 1989)以前已经在科学和天然地震文献中发表过。天然地震监测(由于地球物理学家没有利用人工地震震源，因此称为无源监测)已变得越来越明确和精确，即使在地震活动水平很低的情况下，这大多是因为安置在井下的检波器远离地面噪声，并且更接近于地震能量源(Rutledge等, 1994)。由于在流体的产出(和/或注入)期间油藏围岩应力受到影响同时伴有流体压力的变化，因此会发生小的(偶而会较大)天然地震事件，它表示了沿弱应力面的剪切破裂；对于拉伸破裂来说，在油藏工程的“开裂”压力条件下在注入井中可能发生拉伸破裂。在一些详细的研究实例中，很小的事件似乎指明了反映原油运移的裂缝系统的模式和位置(如Phillips等, 1998)。水力压裂期间的地面倾斜观测和无源地震监测已经在许多情况下改善了油藏的开发(例如，Castillo和Wright, 1995; Li等, 1998)。这两种水力压裂监测技术几乎已成为石油工业界的常规手段(也就是说，它们已不再是处于实验阶段了)，而且能够应用于所有合适的地方。

结论

随着地球物理技术的日臻成熟，它们已使地球物理工作者对构造细节了解的水平不断提高，现在，要实现许多与油藏生产有关的目的也几乎都离不开它。反射地震特别是 3D 地震是勘探中应用最为广泛的技术。不断出现的一些新技术业已成功地证明了它们的潜在能力，但商业应用程度不一，这些技术包括井间、正 / 逆 VSP、单井成像和无源地震监测（重力、电磁和其它的技术在本专辑的其他文章里另有描述）。油藏地球物理学家比勘探地球物理学家所具有的明显优势在于已有关于油藏目标体的数据的数量和质量，实施的测量聚焦于特定的目的层，允许地球物理观测结果对到地层的标定（为了使结果具有一定的置信度这是必须的，同时改善成像质量）。随着地球物理技术成为油藏工程师更为熟悉的技术，随着工程实践活动也越来越成为地球物理学家惯于从事的活动，可以预期，油藏地球物理技术的应用将不断得到增长。

对地震属性的理解

Alistair R.Brown 著 杨勤勇译

三维地震的成功带来了地震属性的普遍应用。属性有助于洞察数据，尤其是当显示在所解释过的空间层位上时。然而，多数有效属性并不是独自存在的，事实上它们是以不同的方式来表示有限的几个基本属性。成功应用属性的关键在于选择最适当的属性。另外，用属性进行统计分析必须在理解其意义的基础上进行，不能基于简单的数学关系。

图 1 是地震属性的分类，其目的是便于理解什么是有效的以及每种属性有什么用途。首先，属性与地震数据中的时间、振幅、频率和衰减等基本信息有关。我们所用的多数属性是叠后的，也就是从装载在我们工作站上的偏移叠加数据体中提取的。叠前属性主要从 AVO 数据中提取。

层位属性是沿拾取的层位提取的，因此它得益于机器自动拾取的精度。位置的精度一般在四分之一毫秒左右，属性值的精度也大体相似。另外，时窗属性则是采用例如 2 毫秒或 4 毫秒间隔的采样值。它们可以对所有采样值作累加或平均，给出总属性。它们可以选择单一属性值，也可以计算时窗内属性值的分布或趋势。

根据时间求取的属性有助于分辨构造细节。根据振幅和频率求取的属性有助于地层和油藏特性分析。这里的振幅属性是最稳健和有用的，但频率属性有助于揭示额外的地质分层。混合属性尤其引人关注，因为它们包含了振幅和频率成分，因此有利于地震特征测量。

当然，岩石物理学研究和地震模拟可以从其它方面帮助理解分析。为了建立属性与油藏参数相关性的置信度，这种理解分析是必需的，它必须是所有属性分析项目的一部分内容。

地震岩性分析技术的最新进展

John P.Castagna 著 王炳章译

引 言

地震分析的目标是直接地震数据中定量提取岩性、孔隙度和孔隙流体成分,岩石物理学为地震岩性测定提供了基础依据。除了常规的叠后反演外,最重要的地震岩性分析工具是振幅随偏移距变化(AVO)分析。本文将回顾地震岩性分析这两个关键方面的最新进展。

SEG 协会在 1993 年出版了二本关于 AVO 分析的书,这两本书主要是对早期 AVO 工作的回顾(Allen 和 Peddy, 1993; Castagna 和 Backus, 1993)。然而,从现在的眼光来看这些书显然已经过时了,其中明显的疏漏包括对 AVO 交会图技术或各向异性 AVO 几乎未作讨论,而对大偏移距和超临界角 AVO,三维 AVO,以及 AVO 异常的统计分析等都未涉及。所以,本文将主要针对两本书中存在的这些问题,论述 AVO 分析中几项重要特殊技术的进展情况。

尽管在 Bourbie 等(1987), Nur 和 Wang (1988), Wang 和 Nur (1992),以及 Mavko 等(1997)编著的书中已经回顾了岩石物理学的进展情况,但从公平评价的角度出发,大家不难看出所论及的内容仅仅是斯坦福大学一家的工作,而且它只涵概了岩石物理学现有文献资料的一小部分。因此,为了引导读者对这些出色的出版物有更全面的了解,本文只讨论与地震岩性分析有关的几项关键性进展,并就任何忽略的内容事先向大家道歉。

岩石物理学进展

速度与饱和度和频率的关系

岩石物理学用于碳氢直接检测的最根本问题是:当孔隙流体成分改变时速度将如何变化?其本质是关系到另一个重要问题:速度和衰减随频率究竟如何变化?特别是我们想知道如何将声波频率和超声波频率下获得的测量结果应用于地震频率下的波传播研究。更确切地说,我们需要一种岩石物理模型,它能把速度从一种饱和状态转换到另一种饱和状态。近半个世纪以来,地震分析家们都是应用著名的 Biot-Gassmann 理论来实现这种变换的。当前的共识是如果恰当地考虑“不均质度”(patchiness),在低频情况下这一理论是可适用的(例见 Knight 等, 1998; Mavko 和 Mukerji, 1998),但在高频或低渗透率情况下,喷射或其他机理就显得重要了(例见 Dvorkin 和 Nur, 1993)。速度—饱和度曲线的变化呈现出与顺从和非顺从孔隙的不均衡饱和有关,同时与空间上的饱和度非均匀性有关(Endres 和 Knight, 1991; Mavko 和 Nolen-Hoeksema, 1994; Goertz 和 Knight, 1998)。然而工作中可能还存在另一种机理,例如 Batzle 等(1997)通过实验求得了流体饱和度改变而引起的速度变化,由此也发现了一种特殊的机理。Brie 等(1995)利用了一种“等效效应”流体模量的概念,这一模量是联合运用纵、横波速度测量值经验性地处理散射场而导出的。他们的方法对于实际的应用是有效的,但作为一种纯粹经验性的方法必定有待局部标定和检验。

孔隙流体性质

Batzle 和 Wang (1992)一直在改进流体性质信息的经典综合,不过遗憾的是这些数

据大多没有见诸于公开发行的文献，特别是需要一种钻井泥浆滤液特性的参考标准，以便进行声波测井数据固有的侵入校正。一般说来，工程地球物理学家需要弄清比通常实践知识更好理解的压力—体积—温度关系和对应的储层流体混合物的性质。

复杂岩性和复合介质模拟

Berryman (1995) 对此曾做了综合评论。过去的十年中针对我们目的的最重大发展，也许就是 Berryman 和 Milton (1991) 将 Gassmann 方程推广到了多组分情况，以及高频模量情况下差分自相容模型应用的增多（例见 Berge 等，1993；Le Ravalec 和 Gueguen，1996）。

横波速度预测

Xu 和 White (1995)，以及 Goldberg 和 Gurevich (1998) 改进了 Krief 等 (1990)，Greenberg 和 Castagna (1992) 的算法。然而，由于存在实验误差，很难证明预测结果误差的改善程度高于 5%。

非线性特性

包括 Bonner 和 Wannamaker (1991) 以及 Tutuncu 等 (1998a, b) 在内的学者们成功地描述了速度和衰减之间的应变振幅关系，这也完全可以由地震岩性专业人员来统筹考虑。

各向异性

由于尺度效应，以及了解先验对称类型和优化实验设计所需的轴向方位的困难性，因此，各向异性参数的实验室测量至今仍是问题（C.Sondergeld 和 C.Rai，个人交流，1999）。许多文献提及需要更大型的测量数据库（例见 Vernik 和 Liu (1997)），以作为地震模拟估算各向异性参数的改善手段（例见 Ryan-Grigor，1997）。Dillen (1999) 等人认为三度空间应力条件下需要更多的测量参数。

时延效应

由于储层固结作用，微破裂作用，以及有效应力的变化或其他岩石流体的相互作用所引起的岩石骨架模量的变化，储层速度随时间的变化可能大于或小于根据流体机械置换预测出的结果。T.Davis (2000 SEG 专题讲座) 得到了与储层开发和强化开采有关的横波速度显著变化的野外观测结果。Wang 等 (1998) 在实验室证明了时间延迟的效应可能比由 Biot-Gassmann 理论预测的结果要大得多。

AVO 分析的进展

AVO 属性

自从 Smith 和 Gidlow (1987) 引入流体因子的概念以来，截距—梯度相关交会图指示标记（例见 Castagna 和 Smith，1994；Fatti 等，1997）的利用成了常规手段（例见 Foster 等，1993；Fatti 等，1994；Nickerson 和 Cambois，1998）。Swan (1993) 曾对 AVO 指示标记作过评论。Castagna 等 (1998) 提出了把背景趋向与岩石物理关系联系起来的公式，将 Rutherford 和 Williams (1989) 的分类法推广到了包括低阻抗储层，即随着偏移距的增加而反射系数振幅降低的 IV 类砂岩。Cambois (1998) 则认为噪音能控制背景趋势的斜率。

孔隙流体识别

从理论上讲，AVO 可被用来区分密度和速度差异，因而能被用来识别孔隙流体类型和饱和度。识别部分气饱和的能力显然是很重要的。在实践中，精细的岩石物理控制和

精确的模拟和/或反演能够潜在地被用来识别流体类型（例见 Regueiro 和 Pena, 1996; Cardamone 和 Corrao; 1999）。可以预期联合 P-P 波和 P-SV 转换波的 AVO 分析将改善孔隙流体的识别效果。

统计 AVO 分析

愈加得到认可的是 AVO 属性应该是带有特定信息（即碳氢化合物）的一种概率测量结果。从岩石物理学和地震模拟的观念可以非常直接地弄清这一问题（Castagna 和 Samake, 1998; Mavko 等, 1998; Dey 等, 1999; Houck, 1999; Sengupta 和 Mavko, 1999）。较困难的在于如何量化由于地震数据质量的变化而造成的碳氢检测的不确定性，这包括把岩石物理学导出的概率密度函数变换到实际地震数据域（这不只是需要简单的正演模拟）。预计今后这将成为地震学研究中一个富有创造性的领域。

叠前成像

AVO 分析并不能与目的层的叠前成像相提并论。正确的偏移改善了信噪比和提取的 AVO 属性的横向分辨率（Mosher 等, 1996）。包括 Ross (1997) 和 Xu 等 (1993) 都讨论了复杂构造情况下的 AVO 分析问题。

三维 AVO 分析

遗憾的是，三维地震数据的出现对于改善 AVO 分析来说并非如预料的那样总是一种恩惠，而目前最普遍的做法仍是对穿过三维数据体的“高质量”二维测线进行 AVO 分析研究。部分问题是因为一般说来三维道集不是保幅的，且仅仅是近、中、远道的局部叠加可用于 AVO 分析。另外，由于经济上的原因，三维数据往往已经减少了叠加次数和孔径。不过最大的问题是与采集的观测系统有关（例见 Canning 和 Gardner, 1998; Ronen 和 Liner, 2000），尤其是难以实施的小块型三维观测系统。总之，对叠前道集采用适当的振幅处理和常规振幅保持后的三维成像，终究将大大改善三维数据 AVO 分析的效果。

噪声抑制

要进行 AVO 分析，作为地震反射数据处理中最有效噪声抑制手段的 CDP 叠加是不适用的，除了以有限偏移距范围（局部）叠加的形式之外。因此，叠前应用噪声抑制技术就显得格外的重要。在过去的十年中，已经证明 Radon 滤波是一项很有用的技术（例见 Foster 和 Mosher, 1992）。Weglein (1999) 回顾了多次波压制技术的最新发展，论述了对 AVO 分析被认为很有希望的反向散射技术。

速度分析

速度分析可以说是 AVO 属性提取最重要的环节。常规速度分析常用的相似统计方法隐含着振幅不随偏移距变化的假设条件。而特别麻烦的是当振幅随着偏移距的增加出现极性变化时，往往在目的层处产生虚假的“拉平”地震道集。包括 Kirilin (1992) 和 Sarkar 等 (1999) 在内的许多专家论述了不致模糊 AVO 效应的速度分析法。Ursin 和 Ekren (1995) 则描述了处理剩余 NMO 误差的自动化方法。

AVO 反演

在有井资料控制的情况下，传统的全波形 AVO 反演是一项非常有用的技术（例见 Buland, 1996; Mahob, 1999）。在没有井控制的情况下可优先选用遗传算法（例见 Mallick, 1999）。不过，没有一种反演方法能够克服固有的非唯一性问题（例见 Drufuca 和 Mazzotti, 1995），而具有反演通常所需的一个好的初始模型对结果是很有帮助的。因此，可以这样认为，传统的 AVO 反演起到了作为一项地震解释辅助手段的作用，它能够提供解释所需而同时又与地震数据采集相兼容的初始地层模型。Simmons 和 Backus (1996) 提出基

于波形的一步法线性反演，假设其具有服从岩石物理趋向的背景条件，利用 AVO 预测误差来作为检测 AVO 异常的一种有效手段。AVO 反演最重要的（却很少讨论或研究的）方面或许正是应用于反演前数据的叠前振幅校正或标定。一般适用于定量反演方法的钻前确定性振幅校正技术尚有待进一步证明。在大多数情况下，一些统计性的振幅均衡形式是必不可少的（Rutherford, 1993；Ross 和 Beale, 1994）。

薄层 AVO

储层顶、底反射的调谐和强反射层附近或复杂储层内的干涉问题始终难以解决。包括 Bakke 和 Ursin（1998）以及 Dong（1999）在内的专家们讨论了校正调谐作用的重要性，或至少评估了调谐效应的重要性。Swan（1993）则给出了对这种效应如何进行补偿的深入分析理解。

N 维 AVO

随着多分量地震记录成本的持续下降，AVO 分析终将常规地包括至少 3 个分量（海底电缆加上一个水听器），并且利用 P-P 反射波和 P-S 波。如果经济上允许的话，甚至可以利用 9 分量采集的数据。而随着计算机能力呈指数持续发展，大数据量的资料处理将成为日常工作。最终，在三维勘探中将常规地采集多分量数据集，采用井下仪器和/或垂直水听器电缆的时间延迟测量也将可能常规地进行。这些复杂数据集的数据集成和振幅保持技术必将需要更多的探索研究。

利用整个叠前道集

在过去的十年中，叠前分析技术已经成功地扩展到远偏移距和偏移距—深度（O/D）范围，亦或两者兼之的情况。加之为成像和 AVO 分析提供了更宽的孔径，更远偏移距的引入提出了新的挑战。这些问题包括处理非双曲线时差，不适当的 Zoeppritz 近似，各向异性作用的增大，以及超临界角影响等等。因为以前在处理中都是切除远偏移距的数据，地球物理服务公司对这些缺乏可以借鉴的经验，而我们也仅仅在最近才开始理解解释这些数据的方法。

非双曲线时差

Ross（1997）证明可以用更高阶的时差校正来恰当地拉平大 O/D 比的同相轴，从而提取更精确的属性参数。各向异性引起道集上的“曲棍球棒”特征是不适合采用双曲线时差的 NMO 校正方法的（F.Hilterman, 1999，SEG 专题讲座），需要应用更高阶或各向异性的时差校正技术。

Zoeppritz 近似的不适应性

Zoeppritz 方程的近似条件一般假设小的弹性参数差异和小的入射角，而在临界角时假设条件不成立（例见 Castagna 等，1998）。Lavaud 等（1999）利用地层参数的一种优化组合来转换大偏移距处的完整 Zoeppritz 方程，以试图突破这一限制条件，尽管这样做可能由于下面将要讨论的复杂化问题而并不充分。Chen 和 Castagna（1999）表明对于小入射角度（30 度以下）的同相轴，曲率项（第 3 个系数）通常应能通过加上垂直入射反射系数的平方而得到校正。

各向异性影响

各向异性对 AVO 分析有以下三种影响：（1）引起非双曲线时差和相应的属性提取误差；（2）带来与角度有关的传播损失；（3）改变入射角度、目的层反射系数（例见 Carcione 等，1998）和临界角的位置（例见 Bork 等，1997）。Ruger（1997）给出了各向异性 Zoeppritz 方程最精确且有用的近似公式，它包含了穿过一个界面时各向异性（Thomsen）参数差异的影响，尽管平均的各向异性作用也会明显地改变反射系数（Chen

和 Castagna, 1999)。方位各向异性也会混淆 AVO 分析, 当然也可用作一种裂缝特征描述的工具(例见 Ramos 和 Davis, 1997; Lynn 等, 1999; MacBeth 和 Li, 1999)。

临界和超临界角影响

远偏移距数据振幅解释的一个常见陷阱是把临界角附近大的振幅增加误认为泊松比的影响。实际上, 临界角的位置仅取决于穿过界面的 P 波速度, 而与泊松比没有直接的关系。超临界角的复杂化影响包括 P 波反射振幅和干涉(转换横波所致)的大幅度减少, 复合的反射系数造成相位移动, 以及出现可能与一次反射混淆在一起的折射首波(例见 Borejko 等, 1998)。相移和首波都可能被轻易地错认为各向异性引起的“曲棍球棒”。超临界角的更进一步复杂化影响是在衰减介质中产生非齐次波。Carcione (1999) 得出这样的结论: AVO 研究不应该基于那些忽略向量衰减的正演模型和处理技术。

结论与讨论

在存在大量井控资料的情况下, 叠后地震数据的定量分析已被证明是储层特征描述的有效方法(例见 Sheriff, 1992)。然而, 在没有井控制时, 岩石参数的准确定量估算已证明是难以理解的, 而地震岩性分析的日常应用就很难超出异常识别的范畴。为了改进参数定量估算的效果, 地球物理学家将必须(1)利用并综合所有可得到的数据(在某种程度上这意味着利用整个叠前数据集, 包括通常按一般做法被切除掉的数据);(2)持续力求在岩石物理学及其在地震分析中的应用方面取得进展;(3)认识到真实地球远比各向同性 Goupillaud 层叠合的假设要复杂得多;(4)适当地研究不确定性和非唯一性;(5)尽可能地涉足全波地震波场和开展时间延迟测量, 以增加非相关的信息。

地震岩性分析是非常复杂的, 预计今后的难点还会更多。如此多的陷阱甚至会使许多潜在的实践者怀疑方法的可用性。而从另一个方面看, 在油气勘探和储层描述中又不断涌现出很多成功的实例, 同时还有许多非常有能力有效地运用地震岩性方法的生产与研究单位。这意味着大家自愿为开拓这项技术投入时间、努力和资金, 那么技术发展和突破的机遇难道还不是指日可待。

地震各向异性

Leon Thomsen 著 朱成宏译

在过去的 15 年里,对勘探和开发中地震各向异性的研究取得了长足的进步,这主要归因于地震资料质量心脏处理和解释质量的不断提高。今天,地震各向异性问题已不再是没有实际意义的学术议题,而常常被看作为关键因素之一。如果不予以考虑,就会严重地妨碍我们对资料的有效利用。不奢望以下简述能包括一切,因为任何这样的企图都注定是不全面的,但它确实反映了当今业内人士所见到的重要新进展,本人将从发展历史直接预测未来趋势。

简要回顾

以往进步的一个重要方面是认识到,速度随方向的变化不仅相对于极角(即与垂直轴的夹角),而且相对于方位角。这意味着横波各向异性尤其引人注目(也复杂),同时在宽方位 3D P 波观测处理和解释中应当考虑到这一点。

有时,最简单的思想是最有用的。在这里最简单、最有用的思想之一是对长期为人们所知的速度随角度变化公式的改写,以直观上更易理解的速度和无量纲各向异性代替基本的“弹性模量”。这一选择照样适用于精确方程的描述,而且,在弱各向异性的极限情况下,简化为我们都能直观理解的特别简单的表达式。

这项工作后来得到了拓展(Alkhalifa 和 Tsvankin,1995),另外,仅仅稍作近似就可以用单一的各向异性实现 P 波资料全部时间域处理。Rueger(1997)把它应用于振幅随偏移距变化(AVO)的定量分析,Tsvankin(1997)又将它推广到了正交对称系(例如交叉的层状岩层),这就为我们分析 P 波方位各向异性提供了一套语言体系。

在这种背景下,Grechka 和 Tsvankin(1998)提出了一种甚至更简单、更通用的 P 波分析方法。他们指出,与深受推崇的时距公式双曲线近似相同,P 波速度和振的方位变化形式上是一椭圆。令人惊讶的是,这样简单的事实数十年前竟没有人注意到。

利用确定横波极化主方向的健方法(Alford,1986;Thomsen,1988),使 $2C \times 2C$ 横波勘探数据中的方位各向异性分析成为可能,它将早期的遥测地震工作与勘探地震联系了起来。用于转换波的类似方法是 Garotta 和 Granger(1988)建立的,虽然当时这一认识的重要性并未引起重视。

在四分量海底地震(4C OBS)测量中发现这种条件下的转换波质量较陆上高得多之后,转换波担当了更加重要的作用。这使人们认识到(Thomsen,1999),极化各向异性在 4C OBS 数据中容易识别,而在 P 波数据中,极化各向异性伪装成各向同性,速度的变化掩饰为深度的误差,常常需要钻井去发现。另外,由于 S 波各向异性通常较 P 波各向异性强得多,因此,在转换波的勘探设计以及处理和分析中都要考虑到此点。

许多年来(参见 Crampin,1990),有关思想得到了发展,即,生产过程中对变化应力场最敏感的油气藏特征是由薄、平、裂隙状孔隙空间部分引起的方位各向异性。这种假说除了看上去似乎有逆理以外,很难在野外资料中检验时变的各向异性。2000 年 SEG 年会上有一个研讨会“RC5:油藏表征:多分量方法和裂隙检测”,展示了着重于新墨西哥州的 Vacuum 油田注入 CO₂ 项目的几项研究成果,显示了在野外证明这一假说的进展和存在的问题。

谨慎地展望

这些进展以及由此产生的其它许多进展还在进行着，但是显然可以预测在未来十年内，以下情况将自然产生：

(1) “常规”采集技术持续改进，将出现崭新的采集方案。这两种趋势都需要认识到地下地层中固有的各向异性，以完全挖掘其潜力。

(2) P 波深度偏移将进一步考虑极化各向异性的影响，用老的简便方法和新的聪明方法估算所需要的各向异性。

(3) 最先进的 P 波偏移算法，特别是那些应用宽方位角数据集的算法，将同样考虑方位各向异性的影响，各向异性由数据集自身确定。用方位各向同性的假设处理这些数据会失望的，这也推动了各向异性研究的发展。

(4) 在勘探问题需要用横波解决时，转换波测量将替代横波震源测量。既然我们已在学习处理和解释这些资料，那么其花费上的优势（与横波震源勘探相比）将强化这种改变。然而，我们将要学习如何在同时考虑极角和方位角各向异性影响的条件下，处理和解释这些勘探结果。

(5) 局部地震各向异性将得到应用，象速度和反射振幅一样，作为一种方法，从岩性、流体和应力方面描述地下岩石特征，将出现新的、富有成效的方法。

(6) 时变方位各向异性将被常规地、稳健地应用，以帮助指导油藏管理人员最佳地开采油藏。

多分量地震学-下一次浪潮

Thomas L.Davis 著 严建文译

多分量地震要求用三分量有时是四分量检波器来记录地震数据。地面三分量测量通常是以二个水平方向和一个垂直方向进行测量,在海底测量中,第四个分量是压力的测量。陆地三分量测量记录了纵波(P)和横波(S),它们代表了地震学中“体”波的全部分量。天然地震学家应用地震波的全部分量来解释我们所生活的地球的构造已经有好多年了,然而,勘探地震学家把多分量地震学引入到地震测量系统中来则慢了许多,但这种情况正在改变。我们要感谢新的地震采集记录系统,它使得我们现在能够在陆上和海上(海底)经济地记录多分量地震数据。将来,通过多分量地震技术,我们可以记录所有陆上和海底地震数据,因此,当我们开始“要弄清不可见的情况”时,我们将迎来勘探地球物理的下一次浪潮。

所谓“不可见”一般是指我们不能区分的地下岩性变化情况,这些岩性变化是我们寻找地层圈闭的基础。多分量地震将使地下一些细微的成岩变化变得更易识别,从而给了我们有效地勘探隐蔽圈闭的希望。另一种难以识别但又很重要的目的层是裂缝性储层。多分量地震学使我们能够确定地下一些小的或机理上不适宜的区带,这些区带通常与裂缝性岩石有关。有的时候,单一的孔隙结构是能够区分的,这就类似于裂缝性岩石和非裂缝性岩石的区分。例如,在碳酸盐岩储层中,裂缝的溶蚀增大形成多孔孔隙层段,应用多分量地震可以来识别它们。最主要的不可见是勘探地震学界的“浮砂砾”(holy grail)——直接识别地下流体特性的能力。天然地震学家发现,地核的外部地层为流体,它不能传播横波。在勘探地震学中,我们在从高饱和度气储层中区别低饱和度充气聚集(gas charged accumulations)(所谓的“漏气”(fizz gas))时受到了阻碍。多分量地震学能够使我们识别地下储层中包括饱和度在内的流体特性。

多分量 4D 地震引入时间作为第四维。油藏监测是通过重复放炮测量或时间延迟测量来进行的,这使得我们能够观测岩石/流体特性随时间变化的差异。油藏监测将有助于我们提高油藏的采收率。多分量地震使我们有望根据压力或压缩系数的变化来测量饱和度的变化,从而提高采收率。换句话说,为了更有效地进行流体管理,我们必须测量流体特性在空间和时间上的变化。只有这样,我们才能将残余储量降到最低。

随着世界人口的增长以及经济和社会的稳定,能源消耗也将稳定增长。因此,利用地球物理技术来发现和产生更多的油气的需求也将更大。通过多分量地震技术的应用,我们将会有许多新的发现,提高采收率,并且在降低经济投入的情况下提高经济效益。我们的石油工业的未来正通过技术的发展而发生着变化,多分量地震技术是促进这种变化所必需的。

时延地震油藏监测

David E.Lumley 著 杨勤勇译

摘 要

近十年来,时延地震油藏监测技术已得到快速发展。在过去的 10 年里已累计进行了 100 多个时延地震项目。目前全世界还有 75 个项目正在执行。每年花在 4D 地震项目上的总经费大约为 5000 万~1 亿美元。与三维地震相比,虽然这一数字微不足道,但过去的十年里,4D 地震的应用呈指数增长,相信以后仍将保持这种增长趋势。

4D 地震的最大优势在于它能对未开钻储层中的流体流动成像。因此利用 4D 地震数据能直接对流体流动成像,而不象流动模拟那样只是预测。与 3D 地震不同的是,3D 地震是勘探和开发的工具,而 4D 地震正在快速发展成为一种油藏工程管理工作。利用时延地震成像能识别死油区,以确定加密井井位、增加可采储量和延长油田的经济开采期限。利用 4D 地震能监测高成本注采作业中流体(包括水、气、蒸汽和 CO₂ 等)前缘的传播,从而,通过优化注采程序能节约数亿美元的经费。4D 地震能对储集块和断层的流体流动特性(封堵和渗漏性)成图,这对复杂油藏流动体系中生产设施和井迹的优化设计非常有用。

斯坦福大学在 80 年代中期所做的岩石物理测量表明,热强化开采(EOR)过程可在地面重复地震测量中被观察到,尤其是在注蒸汽过程中。80 年代中后期及 90 年代初在加拿大、美国和印度尼西亚的几个注蒸汽现场和一个火烧驱油现场做了首批野外试验。结果表明,在时延地震数据中确实能清楚地看到与蒸汽和热气有关的大的异常。接下来的项目是监测等温气流移动,特别是早期在北海和巴黎盆地的工作。这些气藏监测试验也取得了成功,但也让人更加清楚地看到,储层岩石、流体和气成分的交互作用能增强或减弱特定储层条件下的时延地震信号。在过去 5 年里,工业界越来越注重油-水系统的监测。目前,当储层含有高气-油比的油和高含盐度盐水,并且为未固结高孔隙度砂岩时,4D 地震技术就能取得很好的效果;当储层为含气石油并且是固结较好的孔隙岩时,4D 地震基本适用;在死油区或当储层为碳酸盐岩或胶结砂岩等刚性岩石时,4D 地震的应用还面临着技术上的挑战,这与岩石中的流体成分无关。

我们现在已经认识到,能否成功地监测流体流动取决于油藏岩石和流体的特性、压力和温度,以及高精度的地震采集、处理和解释。过去已经在许多方面做了大量的工作,如可行性风险分析,根据 3D 非均质油藏模型进行时延地震数据模拟,岩石物理数据分析,以及流动模拟等。目前许多数据采集和处理服务公司正在继续努力提高野外硬件和处理算法的可重复性与精度。时延地震数据的多数据体定量解释和反演技术正在开发中,它把 4D 地震数据与其它类型的油藏数据综合在一起进行解释,如测井、压力、温度、饱和度、岩心测量、流动模拟和生产等数据。目前正在研究的及下一步发展的方向包括海底和井中地震,永久性检波器埋置,实时油藏监测仪器,横波技术,非地震技术(如电磁、重力和雷达),具有不确定性分析功能的流体流动特性反演技术,油藏数据综合技术,地震史匹配和油藏模型修改技术等。

引言

时延地震油藏监测是指在同一地点在不同时期重复采集地震数据,并对这些数据进

行分析，从而对产层中的流体流动效应进行成像。如果每一次测量都是 3D 的，那么这种时延地震被称为 4D 地震，这其中的第 4 维就是时间。当然还有其它一些时延地震监测法，如重复 2D 地震、重复 VSP 和重复井间地震等。另外，在非地震监测技术方面也取得了新的进展，如时延电磁测量、时延重力测量、时延卫星测量和时延地面穿透雷达测量等。不过，我们在这里仅讨论 4D 地震技术。

地震油藏监测的目的是对生产过程中油藏内流体的流动过程成像。这是可能的，因为油藏中的流体饱和度和压力会发生变化，地震反射特性也会随之发生相应的变化。一般可以假设地下地质条件在开采期间不随时间变化，但也不见得总是这样，例如在加利福尼亚和北海的某些油藏中，油藏的下沉会引起压实，从而会降低孔隙度。既然假设地质条件不变，那么诸如饱和度、压力和温度等流体流动变量在开采期间就会随时间发生较大变化。单次 3D 地震能够对反射界面成像，数据中含有静态地质和动态流体流动特性的综合信息，因此难以从中区分是岩石还是流体的作用。而利用 2 个或多个时延 3D 地震数据集就可以构建差值图像，去除不随时间变化的地质响应，生成随时间变化的流体流动的图像，这就是时延地震油藏监测的基本思路。

岩石物理学和 4D 地震野外数据研究

利用重复地震测量来监测油藏变化的思想产生较早 (Sam Allen, 1996)，然而，斯坦福大学早在 80 年代中期就通过岩石物理测量就给出了第一块定量数据。这种重油饱和和岩心样品的实验室测量结果表明，当稠油被加热时，岩石的地震速度就会大大降低 (Nur 等, 1984; Wang 和 Nur, 1986, 1990; Nur, 1989)。在注蒸汽过程中，如果游离气的存在会进一步加强这种热效应，那么可测量到速度高达 40% 的降低。尽管当时对此出现了许多争论，甚至于斯坦福岩石物理研究小组为此失去了有疑虑的资助商，但现在这些岩石物理预测结果已被世界上众多的蒸汽驱 4D 地震项目所证实。在蒸汽驱监测野外试验中，比较成功的有 Pullin 等 (1987)、Eastwood 等 (1994)、Lumley (1995a, b) 和 Jenkins 等 (1997)。Greaves 和 Fulp (1987) 的“火驱 EOR 监测 4D 地震项目的试验设计和分析”获得了 GEOPHYSICS 的最佳论文奖。如果油藏内存在游离气而没有相关的温度改变，这种情况也能大大降低岩石的地震波阻抗，正如 Domenico (1976) 早期的实验室测量结果所显示的那样。因此这就有可能监测气-液接触面的变化以及诸如甲烷、空气和 CO₂ 等注入气体的移动。比较成功的气监测项目有 Johnstad 等 (1995) 的北海气顶膨胀项目，Meunier 和 Huguet (1988) 的巴黎盆地储气项目，Harrist 等 (1996) 的得克萨斯注 CO₂ 项目。

油水系统的监测在技术上比较困难，因为与游离气或重油效应相比，油饱和与气饱和和岩石之间的地震波阻抗差实在太小 (Wang 等, 1991)。能成功监测油水系统的储层条件有 3 个：一是油的气油比要高，二是水的含盐度要高，三是储层为软的未固结的高孔隙度砂岩 (Anderson 等, 1977; Sonneland 等, 1997; Ebrom 等, 1998; Hirsche 和 Harmony, 1998; Lumley TFFU, 1999)。有着中等风险的储层条件是油和水充填在平均孔隙度的固结岩石中 (Moore, 1997; He 等, 1998; Johnston 等, 1998)。监测最困难的储层条件是死油和水储存在刚性低孔隙岩石 (如碳酸盐岩或胶结砂岩) 中，这种监测与孔隙流体成分无关 (Johnstad 等, 1995; Talley 等, 1998)。Lumley 和 Behrens (1998) 讨论了有关成功监测油-水及其它油藏流体流动系统的实际问题。

可行性、采集和处理

由于油水系统的时延流体信号比较微弱，因此要进行先验可行性和模拟研究，采用特别的采集技术，设计专门的时延数据处理算法和流程。通过加强设计，把 4D 地震数

据的信噪比提高到最大。

对于高风险项目，在采集 4D 地震数据之前进行精确的可行性研究是很有必要的。Lumley 等(1997)开发了一种用于 4D 地震风险评价的快速表格程序分析技术，并在 1996 年的 SEG 年会上获得最佳论文奖。进一步的可行性分析还需要测井分析、岩石物理测量和流动模拟中的地震模拟。Moore(1997)把北海油藏不同等级的注水模拟为 1D 测井曲线 AVO 道集。岩石物理测量选用有代表性的岩心样品，这些样品有着期望的油藏饱和度、压力和温度条件，这样就可预测地震速度和密度的变化(Wang,1997;Hirsche 等,1997)。Lumley(1994)根据流动模拟来模拟 2D 地震数据，以评价北海 Troll 油藏薄油层水平井开采过程监测的可行性。Lumley 和 Behrens(1998)利用非均质地质模型、历史匹配流动模拟和岩石物理岩心测量数据进行了 3D 地震模拟。

地震采集重复性的改进进一步提高了 4D 地震数据的信噪比。重复性研究表明，潮汐、潜水面、环境噪音条件、近地表特性、震源和接收器位置等的微小变化都会对 4D 地震数据产生非常不利的影响(Moldoveanu 等,1996;Beasley 等,1997;Ebrom 等,1997;Rennie 等,1997;El-Emam 等,1998;Porter-Hirsche 和 Hirsche,1998)。通过降低等浮电缆羽状回波，改进海底和陆上采集设计以及安置永久性检波器等，可以减少那些不利的采集效应。某些采集效应，诸如潜水面变化等，不能依靠采集设计来解决，它实际上需要在时延数据处理阶段予以去除。

我们对同一地区多个 3D 地震数据体进行处理后认识到，我们的处理方法并不象我们想象的那样精确。按照我们的算法理论、基于模型和地表一致性的处理技术，多个 3D 地震数据体应该能给出重复的结果，然而相反的是我们常常得不到。另外出乎我们意料的是，在原始 3D 勘探中并不广泛存在的某些同相轴，也就是被分类为噪音的同相轴，在后续的测量中却有着高度的重复性，因此它肯定是实际信号而不是噪音。4D 地震数据处理的目标是要得到每个数据集出色的 3D 地震图像，同时使地下没有变化地区的时延重复性最好。Lumley(1995a)开发出了专有的 4D 处理算法，通过优选处理参数来获得高质量的 3D 图像，同时把非油藏引起的 4D 图像差值减至最小，并用这种方法处理了 6 块 3D 叠前时延数据体。其它公司也开发出了类似的专有处理工具，工业界通常称之为互均衡技术。4D 地震互均衡处理的主要目的是共同寄存重复测量数据，使谱带宽、相位、振幅增益变化、不同的静校正以及同相轴定位均等，从而优化 4D 地震差值异常。Ross 等(1996)、Altan(1997)、Eastwood 等(1998)、Harris 和 Henry(1998)、RickettLumley(1998)给出了 4D 地震互均衡处理的实例。

解释和分析

一旦处理后得到最佳的 4D 地震差值异常，就可以开始时延解释和分析。解释的第一步通常是标定，即把地震数据的时延变化与其它类型油藏数据(测井曲线、岩心测量数据、压力或温度数据、生产史数据等)的时延变化关联起来(Ecker 等,1999)。在标定时，通常根据井数据来模拟地震数据，以确认 4D 地震变化是真实的还是非重复性采集和处理方法引起的假象。一旦标定后，就可以带着“这些时延地震异常意味着什么呢”这一问题对 4D 地震数据进行解释。这一阶段的多数据体解释是定性的，从某种意义上讲，异常经常会被推测为油、水或气饱和度的变化引起的(Anderson 等,1997;Sonneland 等,1997;He 等,1998)。然而，当其它动力学特性发生变化时，如气饱和度、压力或温度(Lumley,1995a,b;Jenkins 等,1997)，以及压实(Wallst 等,1998)或压裂(Johnston 等,1998)引起的不期望有的孔隙度或压缩系数等地质特性的变化，这些会使解释变得复杂。

为了降低解释的模糊性，最好的办法是将 4D 地震数据直接反演为动力学特性变化图，从而进行定量解释，这是目前工业界的研究热点。Lumley(1995a,b)和 Jenkins 等(1997)估计并生成了 Duri 蒸汽驱试验的温度和蒸汽饱和度图。Sonneland 等(1997)利用属性

聚类技术对 Gullfaks 项目的油、水和气饱和度进行了成像。Lumley 等 (1999) 利用地震模拟变换法对尼日利亚近海 Meren 油田的油、水和气饱和度进行了成像。Tura 和 Lumley(1998,1999a,b)以及 Landro(1999)提出利用时延 AVO 反演同时估计流体饱和度和压力的变化。动力学特性估计的一个重要部分是不确定性分析。Ecker 等 (1999) 估计了具有不确定性值蒸汽厚度和温度分布,从而生成了最小或最大特性值图,不过其中还有许多内容仍在研究之中。

解释和分析后,必须提出油藏管理建议。时至今日,利用 4D 地震数据可以监测油藏流体流动,地震技术已能影响工程决策。因此,工作流程中最后也是重要的一步是根据 4D 地震分析提出建议。在 Duri 蒸汽驱项目中,4D 地震分析有助于油藏管理,它可以优化修井方案,通过调整生产井和注入井配置来提高采收率,优化注蒸汽的布局(Waite 和 Sigit,1997)。根据 4D 地震结果可以设计水平井来开采死油或避开水波及层(Anderson 等,1997; Sonneland 等,1997)。不过,现在需要更多公开发表的史例研究来量化 4D 地震技术所带来的经济效益,但大家已从经济可行性上基本认可了这项技术。

发展方向

4D 地震技术发展很快,将来的油藏模拟和管理将紧密结合 4D 地震数据(Lumley 和 Behrens)。现在首先发展的是“地震史匹配”,这是石油工程中生产史匹配的一种改型。在生产史模拟中,根据油藏模型的流动模拟预测的井流量要与所测的井产液量相匹配。同样,在地震史匹配中,在油藏模型中可看到,当流动模拟和地震模拟后,合成地震数据也要和野外记录的地震数据相匹配。如果预测的地震数据与实际野外数据不匹配,可以利用剩余的地震误差来修改油藏模型,直到数据拟合为止。这可以用人工方法或自动修改算法来实现(如共轭梯度法)。总之,油藏模型修改是一种很费时的迭代过程,也是一个很热门的研究课题。Huang 等(1998)以及 Lumley 和 Behrens (1998)发表了地震史匹配和油藏模型修改实例。

目前,油田正在向完全装备化发展,即在一个油藏的井中和地面布设多个可成像的监测传感器。这种监测数据几乎实时有效,因此资产队成员可以据此作出油藏管理决策,用连续的监测反馈数据跟踪决策效果。这种永久性传感器中的许多仪器将采用光纤来克服电子系统的长期可靠性问题。地震监测信息不需要象井中压力和温度传感器那样连续和实时,这是因为地震分辨率的 3D 油藏数据体不可能变化这么快。不久的将来,将开发出低成本的多分量地震 P 波和 S 波传感器并安置在井中和地面上,从而提供即时的 3D 油藏状态图。尽管这些地震测量不是连续或实时的,但毫无疑问从数据采集到最终图像输出的时间最短,也就是数据采集后即刻就能输出图像。这种周期和排列上的挑战将掀起一股开发新浪潮,开发的技术包括地震采集硬件,处理、反演、解释和分析软件,以及用于实时时延地震监测的多维可视化技术等。

新世纪的工程和环境地球物理

Don W. Steeples 著 朱海龙译

引 言

和过去相比,近地表地球物理正应用于更广泛的各类问题,且新的应用领域仍在持续不断地扩大。当前,用于检查近地表环境的方法包括了各种各样的非侵入性方法,这些方法利用电源、电磁源或机械能源,以及测量地质物理参数的各类无源技术。在最近几年的进展中,有些是随着仪器和计算机处理方法方面的突破而出现的,有些是受到了社会需求的激励,如日益增长的关于污染场地精确地球物理描述的需要。在世界各地还存在着一些其他的强制因素,如对地下水的需求日益增加,各种法律规定推动了用于考古目的的地球物理勘探的发展,以及在土工工程和农业方面必须获得更好的土壤物理信息。就其历史发展背景而言,读者可参阅一篇极好的关于 80 年代中期浅层勘探技术现状的回顾文章 (Dobecki 和 Romig, 1985)。

一般而言,在浅层勘探中直接测量的物理参数有:重力场和磁场、电导率、弹性、电磁波的可穿透性和极化性,以及自然伽马辐射。这些测量值可用于推断近地表物质体的渗透率、孔隙度、化学成分、地层、地质构造和许多其他性质。

虽然近地表地球物理方法目前已有许多用途,也存在着许多潜在的用途(表 1),但是一般而言,使用这些测量值及其地质解释是基于下面的理由:

- 1) 是为了减轻现存工程和环境问题,包括地震危害的分析。地球物理方法可用于评价现存问题的程度,预测地下污染物质的移动,和指导勘探钻井计划。
- 2) 作为输入的设计参数用于防止今后的工程和环境问题。地球物理方法正被越来越多地在开工建设前使用,以帮助验证某些至关重要的场所,如发电厂、化学工厂、炼油厂和废弃物处理设施等的地下构造的牢固性。
- 3) 资源的勘探和生产优化,特别是对水、煤和矿物而不是石油的勘探和生产。
- 4) 强化研究及基础地质和水文知识。

为满足这些目标所选用的地球物理方法是随着项目的目标、分辨率要求、可能的预算和地质情况而变化的。例如,地震方法对地下物质的力学性质敏感,而对这些物质的化学成分和所含流体相对来说不太敏感。相反,电法既对所含流体又对存在的磁性或导电物质敏感。但是,在多数情况下,多种地球物理方法同时使用往往对相关问题能给出更好的答案。

下面筛选介绍了一些现有近地表地球物理的优秀方法,当然毫无疑问,各位读者都可以根据自己的知识和经验对列举的方法进行扩充。

井中方法

许多环境和工程地球物理技术依赖于井中测量,原因是它们提供了最佳的分辨率,且能降低近地表信号衰减、地层非均质性和某些类型噪声的影响。在近地表调查中使用的测井下井仪器与石油工业所应用的仪器相同,只是其半径要小一些。由于篇幅所限,不能对井中测量进行有益的讨论。因此,读者如需要了解进一步的信息请参阅有关的科学文献(如, Daniels 和 Keys, 1990; Howard, 1990)。

表 1．近地表地球物理学方法的某些用途*

基础地质和水文学

辅助研究沉积学和地层学
辅助地质成图
检测断层和岩溶条件
确定水文特征
确定潜水面深度
对基岩顶面和塌方底面成图

资源勘探和开发

辅助浅海钻井平台设计
油藏近地表类似物检验
在采掘机工作前检查煤层的完整性
勘探煤、金属和其他矿物
对较深的地震勘探作静校正

民用、采矿和天然地震工程

避免在隧道工程、采矿和其他地下活动中出现意想不到的事情
确定地基加固程度和处理后的改善程度
探测和对地下设施成图
确定岩石的可剥离性
确定桥墩周围的冲刷深度
在地震过程中预测现场增益
为大坝和建筑物地基提供土壤强度估计
确定建筑材料的位置
监测大地运动和物理性质随时间的变化
在压实过程中提供剪切强度随时间的变化曲线
监测大坝和大堤的强度

环境工程

探测是否存在废弃物存贮罐
确定地下存贮设施的牢固性
确定沟渠充填物的性质
评价落水洞周围的地下地质条件
发现基础设施的衰败（如：渗漏的管道和储罐；桥面的损伤）
调查污染物的羽状化
确定废弃物密封罐阻挡层的缺陷，洞和渗漏的位置
对用于废弃物处置的老沟渠成图

军事工程和法律强制要求

检测孔穴
检测未爆炸的军火
在军事行动中监视道路可通行性和尾迹
用于法庭调查（如：确定武器和墓穴的位置）
用于搜救行动（如：雪崩、结构倒塌等）

其他

勘探考古现场
为精确农业使用进行几米到几十上百米的土壤成图

*一些条目如孔穴检测也可在多个工程子目中列举。本表只是给出一些典型的例子，并不打算做到毫无遗漏。

较老的有效方法

电法和电磁 (EM) 法

电阻率法通过测量流过埋置在地表的电极间的电流所引起的电压的空间变化来直接测量大地的总电阻。该方法对孔隙流体化学含量的变化敏感，但不提供大地力学性质的直接信息。电阻率法对跟踪导电的污染物质特别有用。在某些条件下，这些方法还可以用于找断层和埋藏谷，但通常无法达到地震反射法所能达到的精度。

然而在正常情况下，电阻率法和地震法相比却有着极大的成本优势。最新开发的多道电缆仪器，其电缆与地震电缆类似，增强了电法勘探的灵活性和野外工作的进度。电法和电磁法勘探的解释工作通常要求使用反演程序生成一个与数据相符的模型（如：Zohdy, 1989；Ellis 和 Oldenburg, 1994）。电阻率法之所以被电磁法取代是因为电磁法能更快地提供大致相当的信息，却无须使用与大地接触的电极。

激发极化 (IP) 法与电阻率法有关，但是 IP 法分析的是感应电流的大地延迟响应。把 IP 中的 P 设想为，去除扰动函数后，大地仍然保持电扰动的，以时间长度表示的持续状态。在电子学意义上，大地某部分的放电率和电容器的放电率是类似的。感应电压的衰减率取决于带电体中离子的迁移率。例如，粘土中的离子迁移率很高。测量既可以在时间域中进行，此时电压是时间的函数，也可以在频率域中进行。在频率域中测量的是不同频率的相位延迟。可以连接发送器和接收器，或在每天的开始把极为精确的各个时钟调为一致以便确定每个频率到达分压电极的延迟时间。频率通常在 0.05Hz 到 1kHz 之间。这一方法广泛应用于硫化物勘探，在某些地区也应用于地下水勘探。Ward 等 (1995) 指出了 IP 研究中某些可能取得成果的领域。

自然电位 (SP) 法提供了对由电化学活性引起的大地自然电位差的度量。自然电位差极少超过 100mV，且通常在比可能存在的异常大若干倍的距离上达到平均数零。在大地上流动的流体、离子或热可以产生自然电位。因为在记录这些小电位差时采用了无源法，所以源电流或组态得以保持不变。又因为这些电位差很小，所以信号很容易受到来自输电线、管道、雷暴和其他环境噪声源的干扰。SP 法的问题之一是噪声水平有时使得测量无法重复进行。尽管 SP 法在地热勘探中取得了某些成功，但是 SP 法的主要用途却是监测地下水的运动（即，观测磁场中的移动导体）。在地热勘探中，除了地热流体移动造成的电位差之外，矿化水也可能引起化学反应。对化学性质活跃的淋滤液进行浓度梯度成图也许是 SP 勘探的另一可能用途。数据可以通过生成电位差等值线图，或使用更加量化的各类方法进行解释。在这类量化方法中，涉及了各种依赖于几何形态的计算，计算中所用几何形态与磁法和重力研究中所使用的相类似。Corwin (1990) 给出了 SP 法在近地表应用的基本原理。

电磁法在环境地球物理学工作中正得到越来越广泛的运用。电磁法测量的是伴随受原始地下场感应而生成的地下交变电流所引起的电磁场。

在有源 EM 勘探中，原始场是通过让电流流过一个线圈来激发的。该原始场以三维形式向外传播，使得电流按照电磁感应的物理定律在地下导体中流动，从而感应生成一个次生电磁场。该次生电磁场又反过来使原始场发生畸变，由此生成的最终电磁场被接收线圈所读出。被读出的电磁场在强度、相位和方向上与原始场有区别，因此可以揭示出地下结构的传导率。因为这些方法不要求把电极埋置在地下，所以它们比直流 (dc) 电阻率法有更大的优势。事实上，勘探有时可以在低空飞行的飞机上完成。航空电磁法的最新发展之一是具有加快勘探速度，并通过使用小型（最大尺度为 1-2m）无人飞机出入污染、危险或不可接近地区的优势。但是，航空勘探也有劣势，包括源线圈和接收线圈间的间隔有限，以及由于线圈穿越大地磁场移动时引起的较高噪声水平。McNeill (1990) 给出了电磁法的实用背景和理论基础。

在无源电磁勘探中，大地的天然电磁场被用于提供电场的变化。方法之一是音频磁

场 (AFMAG) 法。该方法使用的是以远处的雷电闪为源而生成的电场。另一种无源方法使用了甚低无线电频率 (VLF)。VLF 法依赖的是来自远方的用于和潜艇通讯的高功率无线电发射机的 15-25kHz 的电场。

位场法

磁法勘探，特别是那些采用磁梯度测量的方法，在浅层研究和寻找象钢质滚筒那样的埋在地下的金属物时是很有用的。磁梯度测量是从两台相距几分米到几米的磁力仪上同时读数，然后分析两台同时读数的仪器上的差 (磁力梯度)。磁法测量在断层成图、确定磁性物的位置和估计磁性土料的深度也是有用的。这类勘探被用于检查岩石和未固结土料磁铁矿含量的差异，因此，它们可以探测某些类型火成岩和其他地质构造的变化。在污染现场也用于测量地下含铁金属物品，如钢质滚筒，垃圾填埋场中的含铁金属废弃物和铁管等引起的大地磁场的扰动 (如，Roberts 等，1990a)。磁法测量是一个相对成熟的领域，尽管在数据精度和收集率方面还在不断地改进，同时用矢量记录磁场也可能是有用的。

使用重力的各类方法测量的是大地重力场的极小变化。微重力测量有时用于浅层地球物理勘探，特别是在基岩和上覆冲积层之间在密度上存在明显差异时使用。这类测量使用灵敏度为 1μ 伽的重力仪沿测线进行，或在典型间距为 1-10m 的网格上进行。相对于大地重力场而言，微重力测量的灵敏度处于 10^9 数量级。在校正了数据中引起重力变化的所有已知因素，如地球潮汐、仪器零点漂移、纬度变化、测站间高程差异和地形特征的影响后，剩余的重力异常图反映的是横向密度差引起的变化。若干地质条件包括洞隙、断层、褶皱、倾斜层，以及层内横向非均质性均可能引起微重力异常，同样埋在地底下的人造地貌，如沟渠，隧道，废物储罐和初期下沉也会引起微重力异常 (如 Roberts 等，1990b；Yule 等，1998)。虽然对近地表地层的失水量敏感，但是微重力方法不能直接探测污染物。当开发出快速、准确且廉价的重力仪后，特别是和准确的全球定位仪一起使用时，重力梯度测量 (Butler，1984) 也许会提高其普及的程度。

近地表地震方法

地震折射法用于工程和土工调查已经有几十年了。但是直到 80 年代中期，反射法还没有被用于 30m 以内的浅层。在某些情况下，地震反射法可用于 2m 以内的深度 (Baker 等，1999)，但是这类新的应用能力除了在相对较小但是不断壮大的环境地球物理学界外尚不为人知。

自 1980 年以来，在近地表 P 波地震反射勘探 (Hunter 等，1984；Steeple 和 Miller，1990)，浅层地震折射法 (Palmer，1980；Lankston 和 Lankston，1986)，以及各类面波方法 (Stokoe 等，1994；Park 等 1999；Xia 等，1999) 方面已经取得了重大进展。浅层 S 波反射法还没有被广泛应用，但在文献中还是可以找到若干这方面的例子 (如，Hasbrouk，1991；Goforth 和 Hayward，1992)。通常从面波地震记录中分离同时存在的 S 波是困难的。

层析成像勘探使用的数学方法和医学专业人员用于开发并取得极大成功的对人体进行三维 (3-D) X 射线成像，即通常称为 CAT (计算轴向层析成像) 扫描所用的数学方法相同。该方法依赖于测量通过地下物体的大量地震射线路径的旅行时间。层析成像已经被用于研究尺度从成千上万公里到几十上百米的地球内部情况 (如，Clayton 和 Stolt，1981；Humphreys 等，1994)。

在今后的应用中，P 波和 S 波联合折射法将创造新的可能性 (Hasbrouk，1987)。其中包括借助于 P 波和 S 波速度并结合从重力勘探或井眼密度测井获得的密度，测量岩石的弹性参数。有了这三方面的信息，可以很容易地计算出泊松比，杨氏模量和剪切模量。当测定了这些弹性常数后，就可以识别出岩石的类型，同时初步确定孔隙空间的流体含

量通常也就成为可能 (Domenico 和 Danbom, 1987)。

最近出现的能够采集和处理高分辨率近地表数据的地震硬件为三分量记录和多波型分析开辟了新的可能。面向目标深度小于 30m 的地震方法的能力可以通过分析在数据处理、分析和解释过程中被经典地震反射勘探人员舍弃的地震波型来加以扩展。特别地, 通过使用矢量的三个分量而不是单个分量, 以及分析地震波的多个波型而不是仅分析 P 波, 调查近地表宽频带地震波场正在成为可能。

放射性测量方法

放射性测量方法测量的是由放射性同位素发出的辐射。这类方法可以用于放射性矿物勘探或寻找放射性污染物。自然伽马方法在识别地表 1-2m 内出现的特定同位素时是有用的。在确定天然放射性危害, 如氡气源的位置方面也可能是有用的。Nielson 等 (1990) 曾发表过自然伽马和氡射气方法方面的回顾文章。

较新的一些方法

探地雷达 (GPR)

探地雷达是多种较新开发的方法之一 (如, Davis 和 Annan, 1989)。在许多地区, GPR 被认为是勘探地下几米到十几米地质构造的精选方法。为了进行 GPR 勘探, 将在某个已知时间用微波辐射源向地下发射微波束, 波从地下反射回地面所用的时间用于计算地下不同层的深度, 虽然确定速度仍是一个关键因素 (Tillard 和 Dubois, 1995)。GPR 在许多方面都类似于地震反射。数据以 (或可以以) 与地震剖面相同的格式加以显示。奇怪的是, 这两种方法适用的环境却趋向于相互排斥。因为电磁辐射无法穿透导体, 所以 GPR 在干燥条件且不存在粘土或其它地下导电物质的情况下发挥的作用最佳。例如, 干燥的石英岩质砂岩是雷达波在地表下传播的极好介质, 而地震波在导电的水饱和粘土中传播良好, 但在干砂层却会很快地衰减。

核磁共振 (NMR)

核磁共振是作为实验室测量方法加以引入的, 以便于通过监测原子核能量状态的变化研究分子级的现象。射频脉冲把原子核激励到更高的能量状态。然后监测其恢复到初始状态的过程, 并以指数衰减的和加以模拟, 以双程张弛时间常数加以记录。张弛常数 T_1 和磁化强度的纵向分量有关, T_2 则从横向分量提取。NMR 方法可用于研究具有本征磁矩的任何原子核, 如氢或碳-13。在科学文献中有无数 NMR 理论的回顾文章 (如, McMurray, 1984)。

地球科学中感兴趣的是质子 NMR, 它响应的是大地中氢原子核的状态变化。但是把 NMR 的近地表地球物理应用称为成像可能太早了。一个俄罗斯小组 (Semenov 等, 1988) 开发了“深水探视仪 (hydroscope)”用于收集地球物理 NMR 数据。该仪器由一个发射机和一个接收机组成, 其天线的直径接近于 100m, 因而对水平空间分辨率施加的限制较小。初始磁化强度的幅度与样品中氢原子核的数量成比例, 从而又与作为深度函数的水的总容量成比例。

在发射机关闭后, 张弛时间将包含有关于水饱和岩石的粒度信息。如果多孔材料含水的话, 那么张弛时间就是两种机制: 总流体的张弛和固体孔隙表面张弛的函数。表面张弛是持久的机制, 支配着响应, 这使得在张弛时间和孔隙表面积与体积之比之 (它是粒度的函数) 间存在着一个关系式。Shirov 等 (1991) 运用岩石类型和衰减时间之间的一个经验公式来估计粒度。总的幅度和张弛时间常数采用使计算和实测响应失配最小的某个反演方法来加以提取。

Bryar 等 (2000) 和 Knight 等 (1999) 检查了顺磁性物质 (如 Fe^{3+}) 的 NMR 响应。

顺磁性物质引起 T_2 剧烈变化,使得与表面积和体积之比的直接联系遭到破坏,从而大大加大了得到渗透率估计的难度。例如,两种粒度、孔隙大小和分布完全相同的砂岩,当其中一种砂岩具有较高的 Fe^{3+} 含量,而另一种不是时,可以表现出不同的渗透率。因此,在近地表应用中, Fe^{3+} 和其他顺磁性物质含量的变化可能使基于 NMR 数据的渗透率估计复杂化或失效。根据 Fe^{3+} 的具体位置不同(即,在孔隙水中,吸附到固相,或处在固体矿物颗粒中), T_2 会受到程度不同的影响。

前 景

近地表地球物理学方法的前景是光明的。这些方法将用于满足工程、环境和矿物资源的需求,这种需求在最后一桶石油从地下采出后的很长时间内仍将继续存在。在由 GPS 确定的地区,精确农业的投入和产出是匹配的。精确农业的出现要求有关土壤的物理和化学信息,以便作为应用地理信息系统(GIS)进行分析的附加数据。此外,许多近地表地球物理方法仍在快速发展。例如,当今单接收天线用于几乎所有的 GPR 数据采集,但是多天线 GPR 具有增强 GPR 能力的潜力,这就象 60 年代共中心点勘探改善地震反射法一样。

浅层地震方法可以从不断增加的面波分析中获得巨大好处(如, Park 等, 1999; Xia 等, 1999)。石油工业为消除地震反射数据中的面波付出了巨大努力,但却很少化力气去增强和分析这些波,即使这些波是作为应用浅层地震反射法而正常采集的信息的一部分而被记录下来的。

每一种近地表地球物理方法都可以从自动化程度的提高——从漫游机器人到携带微型传感器在危险或污染地区上空的模型飞机——中获益。即使是近地表地震学也可能受检波器自动埋置的影响而加以调整(Steeple 等, 1999)。

由于需要巨量计算资源,目前地震和 GPR 数据的全波形反演只适用于小数据集。当计算成本充分下降后,这些反演就可能变得很普通。但是,一个警告是反演处理以处理数据的同样方式处理噪声。当浅层地震或 GPR 数据中存在噪声时,数据反演程序可能由于对噪声进行反演而造成假像。

运用地球物理学来感知地下微生物的影响在很大程度上仍然是一个未曾探索的领域(Ghiorse, 1997)。当使用微生物来恢复地下环境的能力得到充分开发后,这个领域可能会获得更大的重要性。同样地,如果实现了地下微生物采矿,那么将需要用于监测这些过程的地球物理方法。近地表地球物理方法具有以高空间分辨率和长时间连续地对各种变化进行测量的能力(Brewster 等, 1995),这使得监测地下生物活动成为可能。

地球物理方法的分辨率和频带宽度必须继续提高。更快和更可靠的数据处理方法也是有用的,其重点应放在降低目前困扰数据解释的含义模糊和不确定性上。此外,降低成本总是所希望的。降低成本可以通过综合运用机器人技术,自动化操作、专家系统和使用小型飞机来加以实现。必须改善关于这些方法的教育,以及把技术从开发者向使用者和受益人平稳转移。

最后,近地表地球物理学可能会对公共政策问题产生影响。表 1 中的若干应用与社会健康和安全有关,其中包括地震危害缓解,污染消除,甚至是全球变暖问题。20 世纪后期,近地表地球物理学与公共安全之间的潜在关系引发了以地球物理学家为职业进行登记注册这样一种趋势。

世纪之交的重力与磁力勘探

R.O.Hansen 著 曹辉译

重力勘探

20 世纪 80 年代和 90 年代,重力勘探的创新主要表现在新的仪器与设备的推出。处理与解释技术进步仅是近几年的事,主要体现在最大限度地提取由新仪器采集的资料的有效信息。在本文的以下章节中,笔者首先介绍仪器的新进展,最后一节介绍处理与解释技术的新进展。

地面重力

Chaopin 等(1999)发表的文章全面系统地综述了近年来重力仪的进展。多年来,重力仪的进展主要体现在地面重力仪的使用上,仪器设计并未出现可供商业应用的根本性革新。导致重大变革的因素是全球定位系统(GPS)的出现。尽管在没有足够的观测时间的情况下,应用 GPS 很难精确地测定垂直位置,但 GPS 的水平定位比差分校正法更好。GPS 的应用大大减少了定位所需的工作量。此外,透光性更强的激光测距仪使获得精确的近带(near-zone)地形值成为可能(Lyman 等,1997)。因此,过去的 10 年里定位与地形数据的质量得到了实质性改进,尽管这种改进难以与重力仪本身精度的提高相提并论。

海洋重力

与地面重力勘探一样,近年来,海洋重力的主要进展亦源于 GPS 的应用。利用多普勒 GPS 速度,由差分法所获得的垂直加速度要比由其它方法获得的结果好得多。这明显地提高了垂向起伏校正的精度,垂向起伏校正是误差预算中的主要项。理想条件下,据说精度能达到 0.2mGal。

航空重力

在航空平台上开展重力测量试验可追溯到 20 世纪 50 年代,但直到 80 年代才生产出可供商业应用的航空重力系统(见 Hammer,1983)。从那时起,航空重力资料的质量不断改进,特别是应用多普勒 GPS 速度校正垂直平台加速度后改进更大。

近来,航空重力主要用于那些难以开展地面重力勘探地区的普查勘探工作,如丛林区或地面地形起伏很大的地区等。据说,航空重力勘探已在几次勘探决策中发挥了关键性作用,由这些重要实际勘探可知,该技术已经进入成熟期。

重力仪

在 20 世纪 60 年代,活动平台(特别是空中)的重力勘探显然是难以开展的,这是因为平台运动的校正量远比目标的有效信号大。为此专门设立了几个项目以研究开发新的重力仪,这些项目把平台误差设计成共模信号。1987 年,进行了首次大规模航空重力勘探(Jekeli,1988)。尽管有人认为这次勘探是成功的,但项目并未继续下去。然而,相同的传感器设计方案被综合到了至今仍然用于商业勘探的海洋重力系统中(Bell 等,1997)。

活动平台重力仪前景广阔,但随着 21 世纪的临近,确定其在勘探地球物理中的位置是良好的开端。在新的世纪的早期,人们将对其充满希望。

数据处理与解释

重力勘探中占主导地位的处理误差仍然是地形改正。数字地形模型的出现以及适用于这些模型的算法的开发极大地提高了这些校正的精度和容易程度。数据变换方法的标准化也有一些改进(例见 LaFehr,1991),这将使我们经过较小的努力就可将重力数据集进行归并,但还没有公认的正式标准。

在解释方面,解释自动化取得了显著进展,但很多实质问题并未解决。尽管目前进行一次特定的处理很容易,但区域场与剩余场的分离仍然是个难题,有时甚至相互矛盾。例如,区域校正中的均衡作用仍然是个问题,并未彻底解决。一旦获得了合理的剩余异常场,就有很多的解释方法可供应用,其中有很多方法直接借用了航磁解释技术。最著名的是现在能建立复杂的、适合于与勘探地震资料进行联合反演的构造模型。解释人员近期所面临的最大挑战是如何发挥重力资料在联合反演中的作用。

磁力勘探

数据采集

与重力勘探一样,磁力勘探在数据质量与数据处理的方便程度方面所取得的最大进展,也是由 GPS 的应用带来的。工业生产中使用的 GPS 系统为航磁与地面磁力系统提供了精确的坐标。因此,15 年前数据采集的质量一般都受到位置精度的影响,今天的影响则主要来自联络测线的假频或飞机飞行的校正。

当然,来自联络测线的假频问题可以通过减小飞行线距与测量高度之比来压制。Reid(1980)写过一篇关于这方面很有影响的文章,文中谈到,逐渐减小线距后就会发现,数据的质量与采集覆盖面积直接相关。

通过 Hardwick(1984)介绍的技术的应用,飞行校正也取得了很大进展。然而,航空磁场可能继续以磁通密度十分之几的量级决定着航磁系统的长波长背景噪音。目前还不清楚到底能获得多大的改进。

几乎所有的航磁数据采集和大多数地面磁力勘探都使用铯蒸气磁力仪。这种仪器的灵敏度在百分之几磁通密度范围内,远远高于航空系统中规定的补偿噪音背景或地面勘探中的地质噪音标准。该系统重量轻,能耗相对小,更为重要的是它有极好的带宽,每秒至少可采 10 个样。这使得使用固定机翼的飞机且以正常的速度飞行勘探时,能获得采样间隔为 5m 的数据。

数据处理和解释

自从早期开展航空磁力勘探以来,除有些方面外,磁力勘探数据的处理没有多大变化。首先,所有的处理当然都由计算机完成,其次,国际地磁参考场(IGRF)现已被普遍用于主要的地磁场消除,可能还有人认为有关这些模型的获得也取得了进展,但与应用国际公认的标准所获得的一致性进展相比,还有一定距离。最后,在进行最终的测线水准平差处理时,已广泛应用了多种形式的微水准平差技术(例见 Minty,1991)。在这一过程中,应用走向滤波技术消除垂直于航线方向的短波长变化场。光栅显示技术的应用推动了该技术的发展,等值线图上出现的明显的水准误差,在晕渲光栅图上会对解释人员产生严重影响。

另一个磁力勘探数据处理问题是地形校正,在该领域中,可能最复杂也是最成功的研究当属 Grauch(1987),但很明显,该方法需要有重要的解释性输入。也许所有可供应

用的这类方法都是这样。

在本世纪末，磁力资料的解释思路与方法可谓繁花似锦。列出这些技术既太占用篇幅也无法详细讨论，但可将它们分成两大类：定性解释与定量解释。定性方法主要是突出数据中目的层（体）的特征。这类方法中滤波技术占主导地位：带通滤波、延拓、归极法、走向滤波、伪深度切片、匹配滤波、导数、解析信号处理等。通常，解释者可选用的方法很多，但却很少有时间对解释结果进行评价。就这一点而言，磁力勘探遇到了方法太多的尴尬。

在定量解释方面，方法之多同样令人眼花缭乱。层状模型的正演模拟、多面体近似模型的模拟或是更简单的棱型模型与圆柱型模型模拟等等已经广泛开展。深度估算方法也已成熟，商用软件和共享软件为我们提供了多项技术。有趣的是，在新方法广泛应用的同时，传统的手工解释技术仍然繁荣不衰。

在过去的十年里，解释方法已由原来的剖面解释向网格化解释发展。这主要是由采集测线的加密促成的。足够密的采集测线使三维解释成为可能，而高质量网格化算法的开发，使得人们能利用各种图像方式解释数据，而现有的计算机资源有足够的能满足各种计算需求。有关这方面的一个重要例子是 3D Euler 反褶积的流行，该方法由 Reid 等（1990）首次提出。在新的世纪，3D 解释技术将会加速发展。

新世纪的电磁勘探

Karen R.Christopherson 著 曹辉译

在写这篇有关 2000 年电磁 (EM) 地球物理勘探现状的文章时,我受到商品价格波动及其它一些影响电磁勘探因素的影响。在过去的两年里,开始时油价猛跌一半,后来又飚升近乎一倍,黄金价格下跌了约 15%,亚洲金融、政治以及政府有关保护环境的政策等,对地热工业打击很大。

我们这些从事电磁地球物理研究工作的专家可利用的技术很多,有关这些技术的简称也很多:MT、EM、AMT、CSAMT、IP、dc、LOTEM、AEM 等等。这些系统既可应用于陆地勘探,也可应用于海洋、航空和井中勘探。我们很庆幸电磁技术的应用领域非常广,包括石油与天然气勘探、矿产勘探、环境研究、地热勘探、工程勘探等。我们都知道上述所有工业都具有周期性。也许去年的情形是对未来的真正考验,这一年上述所有工业的周期变成同步相关,且不幸的是均处于低潮。

然而,由于我们大多数人的坚韧与顽强,我们仍在继续前进。电磁地球物理学近年来已取得许多新的进展,这使得我们可以更好地开展这项工作,并为之而更加自豪。20 世纪 90 年代引入了 24 位大地电磁 (MT) 与电磁系统,且设计上体积小、重量轻。这些系统的设计采用了更快捷的采集系统和更容易的数字记录系统。这些系统几乎可以在任何地方方便地采集数据,因此,有着广泛的适用范围。全球定位系统 (GPS) 已常规地用于信号的同步和计时,由于系统不再需要使用硬连线实现数据同步与记录,这使系统更加灵活方便,采集排列的布置更快,采集站点也不需要固定在靠近其它站点或中心站点的位置。采集系统的另一重要改进是系统允许记录无穷道,仅受实际工作中后勤及预算的限制。十年前这还仅是梦想而已。

在数据的分析中可借助于不同的场分离方法。稳健的信号处理技术已大大改进了数据的质量,使得我们能够在以前认为噪音太强的地区获得有用资料,且采集资料的速度更快。这些技术几乎已应用于所有的电磁方法,例如,稳健的 MT 信号处理技术的应用,已经在以前由于人为噪音太强难以获得有用资料的地区采集到有效资料 (Larsen 等, 1996)。从根本上说,现在能从数据集中恢复更多的信息并处理,从而提供噪声小、频带宽的资料。

常规解释几乎均应用 2-D 模式。工作站提供了更好的综合分析资料的手段。将电磁资料与其它资料 (如地震、重力、磁力、地质等) 进行综合研究已很普遍,当然,这样做能提供更好的结果。快速与灵便的计算机是这些工作强有力的支撑条件。采集费用已下降。总之,与前几年相比,我们的工作可以做得更快、更好、更便宜。

当前的这些进展,是由制造商、承包商、国际石油公司与勘探队伍、研究实验室以及众多大学等单位与机构的共同研究与设计取得的。20 世纪 80 年代,多数大石油公司解散了电磁队伍,很多矿产公司也同样如此。因此,这些进展的取得,是电磁工业竞争精神的体现,也是从事电磁工作的地球物理学家奉献精神的表现。

Wolfgram 和 Hallett(1999)、Davies 等 (1999) 对该学科中这些领域所取得的进展的例子——航空电磁法进行了讨论。他们阐明了如何研究出这些新系统,从而增加了穿透深度,提高了分辨率。资料处理的技术进步使人们可更快地获得更好的信号。现有的有关软件既能进行大数据集 2D、3D 模拟,又具有各种显示功能。

未来的发展趋势会是什么样的?

数据的 3D 反演将变得更为平常。在未来的 5 到 10 年里,随着台式计算机速度的提

高,解释人员在一天内就可完成 3D 模拟工作。这将大大提高获取地下目的层(体)(石油、地热、矿产、工程目标体)更好图像的能力,通常这些地区至少存在一些 3D 构造。

近年来,3D 电磁正演模拟与反演在地球物理学中的应用取得重大进展,有关这方面的总结性文献已可找到,如 Oristaglio 与 Spies(1999)及 3D EM-2 论文摘要集(1999)。积分方程解也取得明显进展,与以前相比,求解的时间已缩短,可更精确地模拟导电率差异。积分方程解主要用于简单 3D 模型。用于复杂三维目标体模拟的最灵活方便的方法仍然是有限差分法和有限元法。在最近几年里,更为有效的共轭梯度算法和更好的约束条件,使复杂三维目标体模拟的收敛速度加快。有限差分法可望改进的是利用电磁位场和混合有限元法(如 Haber,1999)。大多数 3D 模型的正演模拟可在台式机上完成,但非常大的模型仍需利用并行机(Nowman,1999)。绝大多数的 3D 电磁反演仍需用并行机和计算的奇特性才能完成。尽管如此,在这方面仍取得了一定进展,如应用快速松弛法、非线性共轭梯度法及拟线性法等,开发出了实用的反演算法。改进的反向投影法(back-projection method)(Budko 等,1999)是传统迭代反演法的又一选择。正、反演技术的进步,以及计算机内存和 CPU 速度的提高,使 3D 电磁模拟与反演速度更快且更稳定。

电磁与其它数据的联合反演算法正在开发之中,包括不同电磁数据的联合反演,以及与地震、重力、磁力资料的联合反演等。这一工作将充分利用已经获得的反演结果,并能解释人员提供更好的数据综合。

世界能源市场上能源的价格与需求必将上升。毫无疑问,地热和矿产资源的勘探活动也将增多。而且正如我们所知,石油发现的难度越来越大。对于矿产和地热资源的勘探来说,电磁法仍然是主要的方法。对于石油勘探来说,电磁法目前用于那些地震难以奏效的地区,如火山岩覆盖区、逆掩断层区等,这一情况还将继续下去。当我们发现且不需要用常规方法来勘探地下资源时,电磁法在地层远景区勘探中的应用将会增加,该方法在 4-D 领域中(如蒸气驱监测)的应用也将增加。

目前正在开发的一些新技术将采用完全不同的新的采集系统,这些技术有可能使电磁法能对地下介质成像,其中之一是对油气富集区进行间接或直接成像。众所周知,储层内油气富集之处及其上方电阻率会增大。如果该带足够厚,能被分辨,且电阻率的增加足够大,电磁法就可对其成像。有几家公司正在从事这方面的研究,既有利用现有技术的也有开发新技术的(Tasci 与 Zordan,1998)。

信号处理技术的研发也正在进行之中,将来会得到信噪比更高的资料。更快速的计算机将再次在该领域发挥作用。

我们大多数人抱有的期望是对我们所从事的工作应当有更好的认识,特别是石油工业界。地震勘探的普及将电磁法推到了那些所谓的“黑匣子”地带,这是自从电磁地球物理学应用于石油勘探以来,我们一直反对的做法。

我们对电磁工业仍然一往情深。问题是年轻一代的地球物理学家来自何处?我预计在不久的将来,将缺少科学家继续从事我们的工作。因此,我热切地希望继续改进电磁法,同时鼓励学生从事这项工作,以使在该项工作的需求增加时,他们能挑起重担。