

反射地震学的现在与未来

Present and Future of Reflex Seismology

马在田

(同济大学教授,中国科学院学部委员 上海 200092)

自从本世纪30年代反射地震学形成一门学科分支以来,它已成为地球内部结构研究和其它地学研究的有力手段。从60年代开始,由于采用现代电子数字技术和计算机,使反射地震学得到了前所未有的发展。现代反射地震学不但与地质学相关,而且与应用数学、信息科学和计算机科学有着密切关系,因此反射地震学中的许多问题引起其它学科的学者、专家的极大兴趣。其中一些问题是各个学科所共有。反射地震学中的许多理论已成为解决各种科技问题的新工具,如小波理论即是一例。

一、在世界经济繁荣中功不可殒

第二次世界大战后反射地震学从初创走向成熟,在世界能源勘查与开发中起着不可替代的作用。能源,特别是石油,在战后世界经济繁荣发展中起着强大的推动作用,这已是人所共知的事实。由于石油引起的国际争端和局部战争持续不断,就是由石油在各国乃至全球的经济发展战略地位所决定的。石油之所以为世界各国所垂青,还因为它至今仍是比较廉价的能源。石油价格之所以低廉,主要原因是反射地震学在油气资源勘探开发中起着降低成本的关键作用。反射地震学的原理和技术在半个世纪来有飞跃的发展,从而使石油的成本显著下降。如果不采用反射地震学的技术成果,石油的成本将是现有价格的10~20倍,而没有廉价石油世界经济的发展就不会如此迅速。为了从地下数百米至数千米的深处将石油和天然气抽取出来,必然要钻井,钻一口直径几英寸的油井,在陆上需投资数百万元,在海上要投资数千万元,如果钻不到石油,所有的投资将化为乌有。石油在地下并非是连通的油海,而是分布在地下一些低洼盆地内的局部山丘中。要想从地下深处钻取石油就必须首先找出有利于石油生成的盆地和存在石油的地下山丘,而这项任务只有依靠地球物理方法,特别是反

射地震学的理论和技术来完成。否则,在一望无际的平原,茫茫的戈壁沙滩,浩瀚的海洋上寻找石油将是手足无措的,人类社会赖以生存和繁荣的工业血脉石油也将无从取得,可见,反射地震学为人类所做的贡献功不可殒。

二、现代科技水平的综合体现

反射地震学为人类生存与发展做出了重要贡献,但是这门学科的成功不是孤立的,它是与其它学科的发展密切相关、同步的,没有其它学科的发展,反射地震学的发展是不可想像的。促进本学科迅速发展的因素除地震波理论自身的发展外,还与石油地质学理论、计算机科学、数学、电子学、物理学、信息科学和现代实验手段的综合应用与发展分不开。例如,全球有近千个陆上和海上地震数据采集队,每个队都配有现代化的数字地震采集系统,其电子电路的复杂性、稳定性和精度要求都很高,可与其它任何现代高精度电子设备相媲美。在数据采集中要将微米级的地面或水中的振动转化为微伏级的电压,然后放大120分贝以上,用数值形式记录到密度为6250BPI的磁带上,供进一步处理分析使用。在现场采集的数据量相当惊人,每个陆上地震队每天要采集30~80万个数据,海上地震队要采集500万个数据,在油田上每平方公里要采集30万个数据。如此庞大的数据量是其它任何学科领域所不及的。正因为如此,数据处理就要求高度现代化的大型和巨型计算机。今天在地震数据处理中每秒运算100万次的计算机早已显得不敷需要,亿次和10亿次巨型计算机已投入地震数据处理工作中。因此世界各国计算机公司总是紧盯反射地震数据处理这一大市场。

在反射地震数据处理的软件方面发展也非常迅速。由于反射地震数据的采集方式有其自身的特点,它是采用“多次覆盖”观测方式进行的,因此首

先要有适合于自身特点的“地震操作系统”软件。这个软件系统管理地震数据的各种编排组合、数据的输入和输出,以及由各种处理方法编制的模块的联结、分析与组合,以便形成某种处理流程使其能正常运行,同时它有一系列各种检错功能并指出中断点位置。为了将原始的地震数据转变为可以用来进行地质解释的资料,要对原始数据进行各种方法处理,根据不同的方法编制出相应的程序模块,形成积木式的模块集。根据不同的处理目的抽取不同的模块组合成各种处理流程对原始数据进行处理,做出各种地震剖面图、平面图、各种参数谱和立体图。解释人员根据这些图件做出地质成果图并提出有利油气生成和聚集的地区和局部位置,与其它钻井地质和测井资料综合分析后为钻采石油提供最佳井位。

为了使处理后的地震资料能够真实地反映地下地质构造、地层分布、油气分布以及储量估算,需要研究各种处理方法。这些方法是根据反射地震学的原理以及与现代信息理论、信号分析原理、数学—物理方法、人工智能等其它科学知识相结合研制出来的。这些方法涉及面之广,难度之大,都很突出。例如,地震参数的波动方程反问题就是数理方程中的不适定问题,这类问题还远没有得到很好的解决。同时这类问题也是非线性的,而非线性问题的求解仍在探索中。近年来为数学家所潜心研究的从反射地震学的时频分析提取出来的“小波理论”就是一个前沿课题。这个理论的完善与推广应用无疑会对上述问题的解决起推动作用。

由此可见,反射地震学的成功应用和发展是与现代科技总体水平密切结合的,同时又为相关学科的发展提出了问题和探索之路。

三、地震成像研究

反射地震学的任务是测定地下几十米至几十公里深度范围内地下地层分布、构造形态、岩层物性以及所含的流体分布,因此,也可以说是绘制地球表层的图像。这个任务也是一个类似光学成像的过程,不过在过去很长一个历史阶段里,这个过程的许多环节是以手工操作来完成的。当科学技术发展到70年代,在本学科领域充分使用计算机之后,用手工操作无法实现的计算工作都由计算机来完成,如用波动方程进行的波场延拓的计算可以在计算机上实现。人工完成绘图时只取一些主要特征数据,而将地震波的大量信息丢失了,计算机可以全面保留原始的信息。使用计算机,原来不可利用的低信噪比记录经过处理可以利用了,原来不可分辨的地层、断层和局部构造现在可以分辨了。更为重要的是,过去人工要经过一年工作才能了解的地下

地质构造,今天在1~2个月内就可以提供。因此,用计算机得到地下构造图像的过程就成为当代研究的主要方向,这个研究课题也常称为地震成像研究。

现代地震成像研究的主要内容包括地震偏移成像、井间地震层析成像、反射地震层析成像和波动方程参数反演,其中地震偏移成像理论比较成熟,实用效果好。其它三个方面正在进行广泛研究,但由于问题的复杂性,还须在理论、方法和实用问题上进行探索。

地震偏移成像是绘制地下地层结构形态的最有效的方法,它是以描述地震波传播过程的波动方程为理论基础的。任何波动传播的物理过程是从震源向外传播的,而偏移成像过程要求实现地震波反向传播,反向传播不是一个物理过程。要使用波动方程计算地震波的反传问题在数学上是一个不适定问题,不适定问题理论上是无解的,数值计算也是不收敛的。为了解决此问题地震学家提出了各种变型的波动方程或改变求解的方法,终于解决了这类问题,从而使计算地震波的反向传播在计算机上得以实现,并得到了精确的地下构造的图像。偏移成像今天作为反射地震数据处理强有力的手段每天都在进行亿万次的数据运算。我国在这方面的理论研究和实用技术都有自己的独特成就,并为国际同行所重视。

井间地震层析成像是研究两口或多口钻井之间的地层,进而研究油层分布的技术。它是根据医学CT成像原理,用地震波的透射、衍射的观测数据求各种地层中相关的速度、密度和弹性参数,从而判断各种地层的分布与性质,从中分析出油气层、煤层、矿体等分布范围,为开采各种矿产提供可靠的依据。井间地震层析成像在原理上虽然与医学CT成像是一致的,但面临的问题有很大的不同。医学层析成像技术的巨大成功在很大程度上是由于两个因素:一是X射线的传播路径是直线,二是可以从各个方向上对人体(物体)进行观测扫描。而对于地震井间层析成像来说,这两点都做不到。尽管如此,从理论上说井间地震层析成像仍是唯一能确定地震波速度的方法。近年来我国的一些专家在这方面所做的理论研究,特别是衍射层析成像的研究是卓有成效的。国外已开始做现场观测试验,我国也在工程方面做过试验,并将在大庆油田开始对油层进行试验研究。天然地震数据的层析成像工作也正在进行中。

反射层析成像与医学层析成像在观测方式与计算技术上有较大的不同,它是偏移成像与层析成像相结合的一种方法,是一种同时调整反射层深度和地层速度的成像方法。反射层析成像可以在偏移前域进行,也可以在偏移后域进行。偏移后域的反

射层析成像可以把偏移速度分析与反射层析成像结合起来,因此许多为偏移速度分析所发展的实用技术可以用来改善反射层析成像的实用效果,这方面的研究工作正在进行中,问题也不少。

波动方程参数反演是通过解波动方程的参数反问题来求解地下地层的物性参数,如速度、阻抗、弹性系数和密度等,其目的也在于测定地层的性质及其含油气性。国际地球物理学界在这方面的研究已进行十余年了,发表了数以百计的论文和若干专著,但由于地震数据的不完全和介质的复杂性,以及数理问题的不适定性和非线性等多种因素,一直未能达到可实用的程度,目前研究工作仍在进行中。为了解决地震参数反问题,曾采用过类似于量子力学的反散射问题的解法,但未取得明显进展。为了能够得到稳定解,已提出数据与模型正演结果的拟合法,即广义最小平方方法来解此类反问题,即求目标泛函的最优解。但解的真实性的判据也存在问题,因为此类问题具有解的不唯一性,即多解性。在这方面使用最速下降法不能保证求出的是真解。现在正在研究生物遗传算法、模拟退火法和神经网络法来解此问题,前景如何,尚待证实。

总之,地震成像问题的研究还有许多问题要做,其难度是很大的。这些问题的最终解决将不限于反射地震学范畴,而会涉及许多学科领域,如数学、模式识别与人工智能等学科。

四、研究提高石油采收率新技术

世界石油蕴藏量究竟是多少,现在还不能做出确切的估计,但总之是个有限量,不是无限量。即使能够比较准确地估计,从目前的开发技术来看,只能采出其中的1/3,而2/3还留在地下,如果我们能够把它们从地下采出来,可供人类用100~200年。现在有人估计世界石油可采储量最多能维持到21世纪中期,因此,替代能源的研究工作迫在眉睫,这从现状分析是对的。但目前替代能源的研究主要在两个方面,一个是受控核聚变,另一个是太阳能利用。目前,受控核聚变的研究表明,小装置的可控时间仅可维持两秒钟,且费用昂贵,离实用还很远。太阳能汽车虽可行驶,但从成本与功率角度看都还无法付诸实用。因此,维持和延长使用石油能源仍然是具有现实经济价值的。而维持和延长使用石油能源也是一项综合性的新技术领域。而提高采收率,将已开采油田中仍存留地下的三分之二储量的石油采收出来应是主要目标。从目前的技术水平看,采收率从目前的30%提高一个百分点都很困难,更何况要成倍增长。但是,科学技术在发展,我们应当努力开发这方面的新技术,而反射地震学在这方面会起着很大的作用。目前,研究工作已经开始,并且

会长时间坚持下去,为我国乃至全人类的经济持续繁荣做出贡献。目前正在开展的国家自然科学基金重大项目油储地球物理学的理论与方法研究,就是这方面的基础性研究。在此项目中包括有岩石物性研究、测井新技术研究、提高地震分辨率理论与方法研究、多波多分量地震学研究、井中地震学研究和综合解释方法研究。此项研究的成功将会推动反射地震学在提高石油采收率方面的科技进步,同时也会使反射地震学达到一个新水平。

五、在深海探矿中发挥作用

据专家预测,50年以后陆上的铜、镍、钴、锰等金属矿产资源将濒临枯竭,而世界大洋底部沉积有大量的金属结核(人们通常称它们为锰结核),因此人类终将开发大洋深海资源。联合国已经批准我国有权开发太平洋15万平方公里区域内的金属结核资源,当然这是初步的分配,以后还会增加。和任何矿产资源一样,深水海底金属结核也不是均匀分布的,它有富集地带和非富集地带,甚至空白地带。为了以有限的资金投入获取更多的矿产资源,首先就要将海底金属结核的资源分布情况搞清楚。为此,少数国家已着手研究可做6000米水深的深海海底水声和光学调查的深拖系统。我国已开展这方面的工作,如上海交通大学已研制出可在水面操纵控制和显示的、同时进行水声与光学调查的深拖系统。这是一个可喜的成果,它将为我国深水资源调查发挥充分的作用。但是,这种深拖系统工作效率相当低,成本高。如果在15万平方公里上全面进行调查将是一项长时期和高资金投入的工作。如果以高效率的海上地震船,用反射地震学的原理对海底金属结核资源先进行普查,指出有利的金属结核的富集地带,然后再进行深拖系统的水声与光学调查,将会是低成本和高效率的。我国国家海洋局已做了这方面的计划。不过,将目前用于以石油资源探查为主的反射地震学的成功技术直接用于深海海底金属结核资源的调查,不会立即成功,因为二者对反射地震学的应用前提和技术要求有许多不同,有利因素,也有不利因素。有利因素是金属结构位于海底表层,上覆物为海水,海水的密度、速度对地震波来说是相对均匀的,不像石油位于多种不同物性地层之下,介质比较复杂;不利因素是金属结核的体积较小,与现在使用的地震波长相比要小得多,地震数据的分辨率要很高,估计要使用主频为500~1000赫兹的震源。这样的震源需要做新的设计。当然还有一系列采集、处理和解释技术问题要逐一解决。不过从总体来分析,反射地震学能够用于调查深海海底的矿产资源,为未来的海洋开发服务。

(下转第7页)

之间相互钳制,国家才能从“当事人”的身份中摆脱出来,真正做为“第三者”、仲裁人,在当事人之上行使法律的权威,主持社会的公道,也才能因不必事事都管而把自己该管的事情管好。

市场依赖于一般的个人,依赖于民众,其实说到底还是依赖于制度,依赖于调节个人与个人之间相互关系的规则或“契约”;而传统的计划体制,其实质是不相信制度而相信“专家”,不依赖于“法制”而依赖于“人制”。正因如此,传统的计划体制的运行状态的好坏,很大程度上取决于“人”的因素,取决于是否存在“明主”,取决于计划者的“水平”,取决于厂长经理们的“管理素质”、文化程度、责任心以至于道德水平等等,同时还要取决于一般被管理者的“素质”以及他们是否与你进行“同志式的合作”。而市场运作的“要求”却远没有那么高,原则上说,它只要求人们“会算帐”,知道“趋利避害”,谁都可以不是“专家”,“一般人”足矣,鸡鸣狗盗之徒只要出了大狱后不再鸡鸣狗盗,也可在市场上正当发财。应该说,一种依赖于一般民众“平均数”的制度,要比一种依赖于少数个人制度,更容易稳定,更容易持久。

传统的“计划”的思想方法,在我们的这个社会里,可以说已经形成了一种“思维定式”,在任何地方都会表现出来。我们要建立市场经济的体制,首先也要破除思想中的“计划方法”。当前出现的一个引人注目的现象是,在如何进行“市场化”改革的问题上,计划的思维方式也在明里暗里、自觉不自觉地起着作用,导致一些人总是试图“用计划的办法搞市场”。由于我们所面临的特殊的体制改革问题,是从一个高度集权的计划体制向市场经济过渡,因此不可避免地要采取某种“自上而下”、有领导有步骤地贯彻执行的方法,在一些触及许多人的既得利益的情况下还要统一而强制地执行,在改革的最初阶段,就更是这样。对于国有经济的改革,许多问题上还必须这样,因为它本来是高度统一的,各方面的制度本身是相互“配套”的,许多东西不统一地打破、配套地打破,就不可能打破。但这种“自上而下”方法的局限性需要及早认识。有效率的制度必然是能使人们在特定环境、特定条件下以最小成本捕捉住获益机会的某种社会安排,而市场机制的特点正在于能使人们自愿而自动地“分头行动”(而不是

“一刀切”地统一行动),充分利用各自所面临的特殊条件。市场化的改革过程也是这样——只有处在各种特殊条件下的当事人自己,才最知道什么样的体制、什么样的管理方法,最适合于他们的特殊条件,最知道当前怎么改,改什么,迈多大的步子,最适合当前的特殊情况;也只有当事人自己才能创造出最适合于自己特殊情况的具体形式。从各个部门的配套衔接问题上看也是这样,它们最终只能在别的部门发生变化的情况下逐步地相互适应,而不可能齐头并进,一齐“到位”。最后可能实现的“最优”,事实上只能是通过一个一个的“次优”逐步“逼近”的结果,无论我们在理论上论证出的最优状态本身是什么。任何“专家”,都不可能在事前即在改革之前清楚地知道什么样的改革方案适合于各种具体情况,各方面的改革应如何相互配合,相互适应,就象在生产问题或资源配置问题上不可能知道每个人需求、偏好的道理一样。因此,虽然我们需要有改革的战略设计和总体方案,但这些战略、方案都不可要求过细,也不可过分强调总体协调,似乎没有一个精心设计的总体改革方案并按部就班地实施,就不能进行改革,甚至认为那不是改革,认为只有由专家们设计好、配套好的东西才可行,当事人自己创造的东西反倒不行(其实在我们已经取得的改革成果中,绝大多数都是由当事人自己创造出来的)。市场改革是一个关系到千百万民众切身利益的事,许多事情只能由民众自己来完成。只有那些由民众自己创造然后由理论家们加以总结、“上升”为理论的东西才是真正有生命力的,而不是先有理论后有实践的本末倒置。在这个问题上,经常听到的所谓“理论准备不足”,有时不仅不是什么坏事,反而是正常的,反倒说明真正的改革正在实践中向前推进。因此我们应该尽快将改革从以“自上而下”为主的阶段推进到以“自下而上”为主的阶段,给“下面”一个真正的自主权,即自己选择体制创新方式的自主权,用“市场的办法”搞市场。不要怕最初时有些混乱、有些“无序”,真正的有序,都是在无序之中逐步通过当事人自己的相互“交易”、“契约”和反复“试错”形成的,而不是由专家从上面教授而成的。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第23页)

反射地震学虽然目前主要用于石油资源的勘探与开采过程,但它的应用范围是多方面的,它在地壳和上地幔的结构和性质研究方面的应用研究正在进行。现在世界各国联合进行的反射法地震测深大剖面的工作也在进行,观测结果将对了解地球岩石圈的演化、大陆板块运动的成因提供有用的资

料和佐证。此外反射地震学在环境灾害的预测研究,工程地质条件的分析以及工程质量监控上都起着越来越重要的作用。反射地震学将会随着人类对地球及其环境研究的深入而长期发展下去,继续为我国和人类社会的繁荣发展发挥作用。

(责任编辑 蔡德诚、肖庆山)