

# 石油地球物理勘探技术进展与发展方向

张 玮, 詹仕凡, 张少华, 李培明, 王克斌, 冯许魁, 何展翔

(中国石油天然气集团公司东方地球物理勘探有限责任公司, 河北涿州 072751)

[摘要] 石油地球物理勘探技术仍面临巨大的挑战,面向复杂地表、面向多类型地质目标、面向油气田开发提高采收率的地球物理技术正成为未来的发展方向。面对复杂地质条件和高精度要求,理清需要我们突破的关键技术十分重要,同时也是地球物理服务公司实现产业转型,增强国际竞争能力的现实需求。

[关键词] 中国;石油地球物理勘探;技术进展;高端地球物理技术;发展方向

[中图分类号] TE132.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)04-0097-05

## 1 前言

自 1927 年地震反射波法用于工业生产以来,反射地震法一直是石油天然气勘探的主要技术,可以说没有反射地震就没有现代石油工业!进入 21 世纪,油气勘探技术进入一个新的发展阶段,由模拟检波器发展到数字检波器,数字磁带记录将成为历史,能够适应海量数据记录(万道)的高速磁盘记录逐渐成为主流,常规三维观测向宽方位高密度三维观测发展,与之配套的高精度成像、叠前反演和多信息融合的解释技术也得到极大地发展,多波地震、时移地震、井中地震、微地震监测等技术也得到快速发展,面向开发针对油藏的各种勘探方法规模化应用是一个重要的里程碑<sup>[1]</sup>。

新中国成立 60 年以来,通过我国地球物理工作者几代人的不懈努力,形成了以 Klseis 采集软件,GeoEast 处理解释一体化软件为代表的自主品牌,打破了国外垄断,成为技术攻关成果的重要的集成平台,形成了以可控震源为代表的主流物探装备。特别是最近大型万道数字地震仪的研发成功,标志着我国地震勘探装备进入了全系列发展阶段。以中国石油东方地球物理勘探公司为主导推出的复杂区一体化解决方案“PAI”技术系列品牌,浓缩了 40 多年

来的勘探经验,集成了物探技术最新成果,涵盖了复杂山地、沙漠、黄土塬、过渡带、油气富集区、地震储层描述、三维重磁电等各方面。地球物理技术在我国油气勘探条件日益恶劣、发现储量规模趋小、勘探深度日益增加、油藏类型复杂的不利条件下,仍然能够维持较高的油气储量增长起到了关键作用。

## 2 地震数据采集

地震勘探数据采集面对复杂地表、复杂地下地质条件、油藏开发,为适应地震资料处理由“叠后偏移”向“叠前偏移”转变的需要,地震勘探采集技术正在基于叠后观测系统属性分析向叠前观测系统属性分析和波动方程正演观测系统设计转变;由较窄方位向较宽方位、全方位发展转变;由“野外组合”向“高保真、全波场连续采样”转变;由常规激发向高效、高保真激发技术转变。地震勘探采集技术的转变获得了更丰富、更保真、更清晰的地下反射信息,提高了解决复杂地质问题的能力。

### 2.1 复杂区地震采集技术

#### 2.1.1 沙漠区采集技术

针对沙漠区表层疏松、沙丘流动地震波吸收衰减严重、干扰强的特点,发展了沙丘曲线调查、表层数据库、初至波静校正方法,配套激发装备技术的进

[收稿日期] 2010-03-03

[作者简介] 詹仕凡(1962-),男,湖南桃江县人,副总工程师,主要研究领域为石油地球物理勘探解释技术研究;

E-mail:zhanshifan@vip.sina.com

步,有效地解决了沙漠区的深井激发问题。在组合高差允许范围内尽可能拉大组合图形面积,形成了衰减沙丘噪音野外接收技术,该项技术配套应用解决了塔里木沙漠的采集问题。

### 2.1.2 山地三维采集技术

针对山地地表、地下复杂的特点,在观测系统设计上发展了以提高成像质量为目的的三维观测系统分析技术:波动方程正演模拟技术、照明分析技术。采用卫星遥感数据和实地踏勘相结合的检波点及炮点选择预设计技术。针对山地区表层结构变化大的特点,采用大吨位可控震源,大型车载钻机、轻便山地钻机联合作业的方法,解决了激发条件与激发方式优选问题。在解决制约山地勘探成像精度的静校正技术方面,发展形成了基于模型约束的初至折射方法、层析静校正方法,对于多种表层结构特点并存地区,通过多种方法的综合建模解决复杂区静校正问题。

## 2.2 水陆过渡带采集技术

通过持续研发和装备配套,形成了具有国际水平的过渡带地震采集技术,突破了国内外许多过渡带采集禁区,在世界范围内获得了较大的过渡带采集的市场份额。在激发方面,形成了适应不同地表的可控震源、井炮、气枪联合激发技术,研制了不同容量、不同吃水深度的气枪震源船,形成了可以根据勘探区域特点灵活设计气枪阵列的激发技术。在数据接收方面,形成了适应不同地表的水陆检波器联合接收技术,配备了轻型有线防水电缆采集系统、海底电缆采集系统、节点采集系统,能够进行过渡带不同水深的地震采集需求,自主研发了声纳二次定位系统、开发了初至波二次定位软件,确保了接收点定位精度;在综合导航及采集质量监控方面,也逐步形成了自己的特色技术和软件,确保了过渡带地震采集质量稳步提高。

## 2.3 高密度采集技术

我国东西部油田开展了大量的高密度先导性试验和现场试验,产生了以均匀采样、连续采样、对称采样的高密度地震勘探理念,形成了最大可记录信号无污染空间采样设计方法以及基于叠前噪音压制的观测系统设计方法、最小数据集构建及三维线性噪音压制技术等高密度地震勘探技术。针对陆上高密度地震勘探的勘探成本问题,着重围绕交替、滑动以及 HFVS 可控震源高效激发技术及数据分离的方法研究,形成了具有国内特色地可控震源高效采集

技术。

## 2.4 采集技术发展方向

### 2.4.1 可控震源高效采集技术

为了配合高密度采集,国际上已经形成了可控震源高效、高保真等勘探技术,交替和滑动扫描已经广泛应用,HPVA,ISS,DSSS 等技术在局部范围内也获得了采集成功,野外数据采集和数据分离技术成为国外地球物理服务公司竞争的高端技术。目前国内已经具备可控震源交替、滑动、DSSS,ISS,V1,HFVS,MD 等高效采集、高保真采集的能力,但部分方法的采集设计和后续资料处理还没有完全掌握,是下一步重点探索和研究的重点。同时可控震源的低畸变、宽频激发和高的有效出力等方面的研究也十分重要。

### 2.4.2 面向复杂区叠前成像采集设计技术

从资料处理的角度出发,使地震采集观测系统设计有利于资料处理时噪音分析和压制、叠前偏移成像处理,有利于目标体最佳的噪音压制效果、对称和聚焦的 PSTM 响应。因此,基于叠加响应、DMO 响应及 PSTM 响应等观测系统属性的分析技术是下一步面向叠前成像采集观测系统设计分析的重点。

### 2.4.3 面向过渡带及海上采集高端技术

发展过渡带及浅海 OBC,OBV 勘探技术,进一步提高过渡带及浅海勘探的作业水平;发展 M4C 或矢量勘探技术,发展海上宽方位/全方位/多方位地震勘探;发展海上 4D 地震勘探技术。同时还要注意解决海上技术发展的瓶颈问题:如气枪阵列设计基础理论的研究,拖缆综合导航技术的研究,使过渡带及海上采集勘探实力持续增强。

### 2.4.4 高密度宽方位无缆采集技术

由于陆上高密度勘探成本较高,使该项技术难以大规模推广应用,研究经济可行高密度地震勘探技术直接关系到高密度地震技术的发展。利用无缆采集使高密度实现采集单元内置存储方式,大大提高带道能力,实现高密度宽方位甚至全方位采集,利用内置存储器连续记录特点,可有效运用可控震源高效采集技术,提高施工效率,降低勘探成本。

### 2.4.5 面向开发领域高精度地震技术

面向油田开发的地震技术有:高精度三维(一般以高密度宽方位为主导)、时延地震技术、多波多分量、VSP、井间地震、井地联合勘探技术、微地震监测技术等。他们各自具备不同的信息成分、精度、分辨率、观测范围等特点,要根据油田开发的具体情况

和需求来选择使用某项或综合使用某几项开发地震采集技术。

### 3 地震数据处理

地震数据处理技术在高信噪比、高分辨率和高保真度等处理方面日趋完善和多样化,各向异性叠前时间偏移、叠前深度偏移、海洋资料处理配套技术、数据规则化技术、井控处理技术和地震属性监控等技术已经成为提高地震资料成像精度的主要手段。随着处理技术的快速发展,处理软件日益更新,通过引进优秀的综合地震数据处理软件系统,能够有效地支持各种常规处理和特殊处理。国内在面临技术封锁的情况下,一直致力于具有自主知识产权的物理解释一体化软件的研发,GeoEast2.0地震处理系统已经开始全面推广应用,勘探软件国产化已迈出了关键的一步。

#### 3.1 叠前时间偏移

在速度横向变化不大的情况下,叠前时间偏移技术作为复杂构造成像的最有效的方法,避免了叠前对模型所做的水平层状假设条件,从而拓宽了它的适应性,提高了资料成像精度。20世纪90年代之后,为了减少勘探开发风险,石油公司纷纷加大了叠前偏移处理技术的应用力度。国内在小规模试验基础上,从2005年开始该项技术全面推广应用,替代叠后偏移技术,成为常规处理技术之一。该技术推动了国内油气勘探的突破和深化,也推动了我国富油凹陷整体部署和整体解剖的勘探思路,带动了大批的高精度二次三维地震勘探的实施。

#### 3.2 叠前深度偏移

众所周知,在构造复杂,速度场纵横向变化大的条件下,叠前时间偏移的成像位置与地下实际位置存在较大的偏差,只有通过叠前深度偏移方法解决。到20世纪90年代初,叠前深度偏移处理技术成功地应用于墨西哥湾盐下油气勘探,它已经成为提高复杂构造成像精度、降低勘探开发风险的主导技术,是近10年地球物理技术进步的显著标志之一。然而,我国的地质及地表条件比墨西哥湾的情况复杂得多,地表条件多样化,地震资料信噪比极低,通过多年攻关,先后在偏移基准面、速度模型建立、深度校正等关键技术取得一定的认识,并发展形成了自己的积分法和差分法的叠前深度偏移处理技术。目前在我国西部前陆盆地(库车地区、塔北地区、昆北地区、吐哈山前带)的复杂高陡构造勘探中,叠前

深度偏移技术得到了广泛的应用和发展,为准确落实复杂构造圈闭发挥了重要作用。

#### 3.3 处理技术发展方向

高密度海量数据处理技术。随着地震仪器带道及计算机能力的提高,高密度空间采样地震勘探技术是目前得到快速发展的一种提高地震勘探精度的新技术。成像速度分析、全方位偏移成像、方位各向异性等技术需要进一步研究,研发适合海量数据处理方法软件也是占领高端处理市场的需要。

高精度的叠前深度偏移成像技术。理论上各向同性的Kirchhoff积分法偏移存在缺陷,而波动方程叠前深度偏移技术基于波场延拓理论,更加接近波的传播过程,可以解决多路径问题,能适应陡倾角及速度场的横向剧烈变化。可以提高复杂地区地震资料的成像精度,改善成像效果。单程波的炮域波动方程偏移、双程波的逆时偏移技术,考虑各向异性的延拓法波动方程深度偏移需要进一步研究。真地表的叠前偏移技术在解决复杂区问题成像方面逐步受到地球物理者的重视,代表了今后的发展方向。

多波、多分量处理技术。多波、多分量地震勘探发展迅速,其中转换波勘探成为主流,我国已经完成多块多波三维采集,目前野外采集技术相对完善,陆上多波采集达到国际先进水平,但处理和解释相对滞后,没有达到工业化应用水平,需要加强这方面的研究。

### 4 地震资料解释

地震解释技术从以铅笔橡皮为工具的手工解释,人机交互解释,发展到三维可视化虚拟现实一体化综合解释;从研究宏观的构造发育规律,到实现精细构造描述、地层解释及储层描述;从构造、储层、油气藏平面成图到三维实体建模方向发展。

#### 4.1 构造精细解释技术

高精度断层识别技术。断层解释是精细构造解释的核心,早期依靠波组的不连续性解释断层,20世纪90年代发展到应用相干体识别断层,断层解释第一次取得重大突破,如今第三代相干体、曲率体、频谱分解、构造导向滤波等反映地震数据不连续性的现代属性技术应用,使得小断层空间分辨率更高,不仅改变了传统的地震解释工作流程,而且提高了断层解释精度和效率。

反射层自动追踪技术。相似性、特征值、蚁群算法模式识别等技术应用于同相轴自动追踪,不仅提

高了地震解释的效率,而且提高了层位拾取的精度,便于开展各种沿层地震信息分析和地震反射异常体的追踪解释,在此基础上发展形成了三维体解释技术和地质体三维雕刻技术,它是三维可视化解释技术的基础,对提高构造解释精度、开展岩性解释发挥了重要作用。

#### 4.2 储层预测及油气检测技术

层序地层解释。层序地层解释技术的发展和应,将传统地震构造解释推向沉积地层与岩性解释的新时代,形成了基于层序界面控制的地震信息分析、波阻抗反演、“等时地层切片”解释等新技术,提高了地层岩性圈闭识别与描述的能力。

地震属性分析。地震属性是指由叠前或叠后地震数据,经过数学变换而得到的有关地震波的几何学、运动学、动力学或统计学特征。它是地下地质结构、岩性和所含流体性质等多种因素在地震资料上的综合反映。因此,可用沿层、层间等多种方法提取目的层的各种地震属性,对其进行地震地质综合解释。地震属性分析正由传统的振幅、相位、频率波形属性向算法复杂、更加具有地质意义的现代属性方面发展。

地震反演技术。地震反演作为一个重要的储层预测技术,分为叠前、叠后反演。叠后地震反演已经由传统的递归反演,发展到测井约束反演,非线性随机反演开始应用。叠前反演考虑了反射系数随入射变化的因素,可获得纵、横波阻抗、速度比、泊松比及其他弹性模量参数,减少了由于纵波受流体影响而产生的多解性,提高了地震解释的精度,他使地震解释由叠后扩展到叠前。

油气检测技术。传统的叠后油气检测技术“亮点”、“暗点”、“极性反转”、“平点”响应也得到发展,根据油气层对高低频地震信号的吸收衰减作用,发展了基于频率吸收衰减的含油气检测方法。具体实现上先后发展了谐振法、时频分析油气检测法、谱比法、频谱斜率分析法等等。而 AVO 及叠前反演技术的发展使油气检测技术由叠后走向叠前,提高了预测精度。

#### 4.3 地震解释技术发展重点

解释技术的进步,无疑在复杂油气勘探开发条件下发挥了重要作用。随着面向复杂地质体和面向油气开发需要,地震解释技术的发展主要体现在几个方面:

1)复杂构造的描述和实体模型的建立是构造解释技术发展的重要方向。

2)处理解释一体化的信息分析和现代属性解释技术是地震解释发展方向。

3)高精度叠前反演(包括多波多分量联合反演、非线性反演、深度域反演、波形反演、基于层序及沉积相控制的反演、地质统计反演等)是岩性及储层预测的主要研究方向。

4)基于勘探开发综合数据库的一体化三维可视化体解释技术。

### 5 综合物探

综合物探主要应用于油气勘探前期查明盆地结构、基底起伏等基本地质问题。近年来,综合物探技术有了长足进步,面向复杂地表及地下构造方面,主要采用三维 CEMP 和高精度重磁力联合勘探综合解释方法,发现有利勘探目标,为地震提供部署方向或基本构造模型;在深层特殊地质目标(古潜山、深层火山岩、盐下构造等)勘探区,主要采用三维重磁力和大功率建场测深法联合落实深层目标,配合地震进行综合解释,以多种信息锁定深层目标位置和性质;在油气目标检测与监测方面,主要采用时频电磁法和井地电法,查明目标是否为高阻、流体等含油气特性,为三维地震和钻探部署提供依据。

#### 5.1 重磁勘探技术进展

高精度重力外部校正方法。自 20 世纪 90 年代中期,发展了利用卫片航片高程数据体重力地形改正技术和超远区球面重力地形改正方法。在复杂区,发展和应用了变密度地形与中间层改正技术,更好地消除了常密度改正引起的重力异常相关畸变。

重磁异常的曲化平。在复杂山地,发展和应用了消除测点起伏引起的空间差异引起的重力、磁力异常影响的曲化平方法,其中有正演迭代拟合和保角变换等技术,并应用于实际数据处理。

三维重磁反演。三维重磁反演是重磁勘探方法最重要技术进步之一,自 2000 年开始国内对三维重磁反演方法研究增多,包括界面反演和物性反演,在反演计算速度和约束算法实现方面有较大进步,在固体矿和油气勘探领域,特别是火山岩勘探均有较好的应用。

#### 5.2 电法勘探

三维 CEMP 勘探技术。针对传统 MT 和二维 CEMP 存在的不足,提出了小面元采集技术,采用网络式同步观测极大地提高了数据采集精度,在室内开展三维的规则化处理、静校正和正反演模拟,获得

更接近于地下实际电性分布的三维地电模型,提供更准确的构造解释结果。

地面和井地时频电磁法。时频电磁法是近年发展起来的一种新型电磁勘探方法,将可控源频率测深与瞬变电磁测深合并在一套系统中,一次采集即可获得时间域和频率域信号,改变了常规电磁法时、频域分立作业的模式,提高了采集效率和探测效果。地面方法主要应用于圈闭目标的含油气概率检测与评价,井地方法主要用于圈定探井及周边油水分布。

海洋可控源电磁法。经过几十年的研究,海洋可控源电磁法终于在 21 世纪被推广应用于深海油气勘探,用于检测已知地震圈闭是否含油。它是在海底释放大功率电磁波,通过海底采集站接收来自高阻油气藏的强反射信号,因此,获得的电磁场振幅曲线远远高于无油气藏的曲线。国际大油公司已经将该方法规定用于钻前探井部署与评价。

### 5.3 重磁电综合解释平台作用

重磁电震联合处理综合解释方法。以地震工作站为平台开展重磁电联合处理和综合解释已成为发展的必然趋势,目前,已经实现了顺序人机交互联合反演技术,以地震及钻井资料作为约束,在统一模型下,依次反复进行重磁电资料的反演,直至获得合理的地球物理模型。同时,在同一平台上开展多种资料的综合解释可以有效地去伪存真,提高资料解释可靠性和准确性。

多元油气目标识别系统。多元油气目标识别系统是从重磁电及化探、地震等多种物化探方法中提取指示目标含油气信息的数据,然后,充分利用先验信息,将众多的含油气异常信息进行聚类、融合、归纳、总结以及模式识别等处理,更有效和客观地提取目标的综合参数信息,提高含油气目标预测准确性。该识别系统和方法的提出和实现将改变传统含油气目标单方法预测的现象,为高精度勘探提供有效预测方法。

### 5.4 我国综合物探技术发展方向

面向高精度,三维重磁电勘探技术将成为主流。重磁电三维直到最近才明确提出,但已经成为重磁电技术发展的一个方向;对于重磁勘探,则以高密度高精度数据采集和三维反演为特征,而电磁勘探则以小面元采集方法、多场源激发和三维正反演为特征。

面向综合,多种物探方法联合勘探。多方法联合勘探是解决复杂地质问题最有效的手段,已经成

为国际大油公司的共识,是目前油气地球物理勘探方法发展的一个重要方向。地震方法的短处有时正好是重磁电的长处,多方法联合勘探综合解释可以发挥不同物探技术间的互补优势。

面向开发,向油气目标检测及开发领域发展。高精度重磁电勘探技术正在向油气检测和开发监测发展;海洋可控源电磁勘探已经被西方油公司列入海洋勘探程序,推动了海洋电磁研究与应用;人工源时频电磁技术检测目标含油气概率也得到国际大油公司的青睐,井间电磁和地井电磁等方法应用于油田开发寻找剩余油气和监测开发过程。

## 6 结语

国内油气资源勘探开发潜力的挖掘,以及我国油气海外战略的实施,物探市场广阔而美好,石油物探迎来了技术发展新的机遇期。虽然石油物探技术在过去发展中得到巨大的进步,但也面临严重的挑战应对复杂地表条件物探技术尚待加强。如西部复杂区面临高大山体、高陡构造、极低信噪比问题,中东部巨厚黄土塬、大型城镇、矿区、水网、淮海地区施工难度较大,南方碳酸盐岩、火山岩出露区如何获取可靠的地震资料一直是面临的勘探挑战。地球物理勘探技术面向油气藏开发能力不足。物探技术能否为油田开发提供更为精确的储层描述和剩余油分布等信息是一个挑战。

主要技术装备依靠进口,高端服务领域受到国外公司竞争限制。国际大的地球物理服务公司加大了对高端技术的准入门槛,他们采用高端处理软件限制海外使用甚至禁售,地震仪器和可控震源绑定或者用只提供服务的方法进行技术垄断,使得我们进入国外高端市场能力不足,开发自主知识产权的软件、装备、突出原创技术进行产业技术升级,增强国际竞争力,进入高端地球物理服务市场势在必行。应该清醒地看到石油地球物理勘探面临巨大的挑战,找准技术引领未来发展方向,突破高端关键技术,解决实际问题,才是我国石油物探技术发展的根本出路。

### 参考文献

- [1] 钱荣钧,王尚旭,詹世凡,等. 石油地球物理勘探技术进展 [M]. 北京:石油工业出版社,2006

(下转 112 页)