

油气地球物理勘探学的发展现状与展望

一、油气地球物理勘探的地位和作用

地球物理是将物理学的理论、方法用来研究地球,从而与物理学的分支学科相对应,有重力、磁力、电法、地震、放射性和地热等多种方法。每一种地球物理方法都是以岩石的一种物理性质(如密度、磁化率、电阻率、速度、波阻抗等)为参数来认识地质体的。由于地质体具有多种物理性质,而任何一种地球物理的反演问题的解答都不是唯一的,只有综合运用各种地球物理方法所观测到的数据,才有可能比较全面地认识地质体。在油气勘探中,一般都分为普查、勘探、开发 3 个阶段。

(1) 普查阶段——任务是圈定沉积盆地,认识其中的沉积构造,发现有利于油气聚集的圈闭,在地面地质研究的同时,普遍采用综合地球物理方法。采用轻便而又经济的重力和磁力进行区域测量,探讨基底、沉积层与断裂的展布;使用大地电磁测深和反射地震方法。通过综合地质地球物理方法来获取区域与深部的信息,尽可能较全面地认识测区的形成演化历史,为后续工作奠定基础。

(2) 勘探阶段——详细研究圈闭中的储集层,对油气作出预测,为钻探提供依据。在这个阶段里,更多地依赖于反射地震勘探来取得对地下油气圈闭的了解。近年,高分辨率反射地震的发展,通过二维、三维地震数据的采集,在构造研究之外,还可以根据地震相判断沉积相,进而推断沉积环境,再根据层序地层学原理发现隐蔽油气藏,如胜利油田应用高分辨率地震对古河道砂的研究。当然,用反射地震叠前深度偏移技术研究古潜山也是一个复杂课题。在勘探阶段仍不应忽视综合地球物理研究的作用,近年重力仪器已由毫伽(mGal)级提高到微伽(μ Gal)级,有三个数量级的进步;磁力仪器由质子旋进仪发展到光泵磁力仪,其精度同样增长了三个数量级。这样,重磁在油气勘探阶段中,也可能发挥更大的作用。例如,应用高精度重力作出剩余重力异常图,可能相对简单得多地发现古潜山的分布。

(3) 开发阶段——详细研究储集层,包括采油过程中的动态变化,以提高采收率。开发阶段的油藏地球物理技术已经涉及岩石物理、油藏建模、油藏描述、油藏管理、油藏监测、油藏开发及经济评价等诸多方面,已在世界范围内得到广泛应用并不断带来巨大的经济效益。

油气地球物理勘探是地球物理学在应用领域的一个重要分支,地球物理学理论的每一次创新,都会及时地应用到油气地球物理勘探,指导油气地球物理的勘探实践,而油气地球物理勘探实践中的观测数据和相应的验证(如钻井)又推进了地球物理学学科的进步和理论的提升。

二、油气地球物理勘探的国际进展和发展动向

(一)地震勘探技术

1. 采集技术

(1)针对目标的观测系统设计。应用三维射线追踪法针对地下模型(特别是目的层)进行模拟,针对复杂目的层,研究其照明情况(质量),特别关注阴影区和相应的叠加次数,指出有照明问题的区域和相应的改进办法或追加辅助采集的措施。

(2)高密度采集技术。利用高密度采集提高地震信噪比和分辨率,提高成像质量,减少脚印对数据的影响。

(3)利用加金炸药提高信噪比和分辨率。加金炸药是指一组在炸药中添加易氧化金属的混合炸药。这些金属包括镁、硼、钙及其他的混合物和合金。炸药反应一开始,爆炸振动波通过炸药,压缩炸药中的孔隙,给其中的金属造成压力。金属受压之后产生热量,促使燃料和氧化剂开始化学燃烧反应。其中的金属起到敏感剂的作用,大大提高了其周围化学反应开始的点数。一旦化学反应开始,金属的反应又形成金属氧化物,在反应的炸药混合物中产生更多的热量,从而增加了反应的速度,提高了爆炸的能量。等量加金炸药比不加金的炸药产生的能量要大得多。

2. 处理技术

(1)层析成像静校正技术。当表层存在高速层时,常规地表一致性静校正难以达到预期目的,因为射线不是近似垂直于地表的,在这种情况下用反演的办法求取的地表一致性校正函数进行校正,可以大大提高校正的精度。

(2)属性表征技术。属性表征技术是用不同角度的射线照明法显示三维时间切片或属性,其目的是突出垂直照明方向的特征,压制平行照明方向的特征。

(3)裂缝识别技术。对碳酸岩盐、裂缝性砂岩等裂缝性油气藏,目前使用最多的仍是从P波中提取信息,主要是其统计效应,如裂缝密度分析、发展的方向、单个裂缝的识别和成像。利用 AVAZ(Amplitude Versus Angle and Azimuth) 预测致密地层中的含油气裂缝;应用神经网络和倾角驱动在三维数据体内同时对地层和断层追踪成图;应用人工蚂蚁实现断层自动追踪断层面。

3. 成像技术

近几年地震深度域成像技术在国内外得到了迅猛发展。在方法理论研究方面,国外以美国斯坦福大学为代表的一批地球物理学家在 Kirchhoff 积分法、共方位角波动方程深度偏移成像及炮域的波动方程深度偏移成像方面取得了一批重要成果。美国加州大学吴如山教授领导的模拟和成像实验室、以色列的 Paradigm 公司、美国的 ADS 公司、美国的 Landmark 公司以及法国的 CGG 公司等推出了地震深度成像成果的软件产品。

随着地震勘探的不断深入和研究的构造日趋复杂,人们提出了许多改进后的成像方案。最初建议采用 DMO 加叠后偏移的方法解决速度依赖倾角的问题,但由于速度的求

取与成像脱节,因此在剧烈横向速度变化的区域,如盐丘、逆掩断层带、古潜山等,该偏移方法往往造成成像位置不准确,甚至出现虚假构造。于是,人们纷纷把目光转向叠前深度偏移成像,特别是基于速度模型的叠前深度偏移成像。叠前深度偏移成像克服了水平叠加速度不准确引起的部分误差,使得地震成像精度大大提高,但由于叠前深度偏移过程中的数据及计算量巨大,受计算环境的限制,因此它与计算机技术的发展密切相关。叠前深度偏移成像的发展大致可分为三个阶段:第一个阶段是计算量相对较小,易于实现的 Kirchhoff 积分偏移成像。该方法的实现曾在地震勘探界掀起一股叠前深度偏移热,它极大地推动了叠前深度偏移的发展。但由于 Kirchhoff 积分法是对波动方程的一种高频近似,其缺陷是无法解决在对复杂模型的射线追踪过程中出现的多路径或者出现射线无法照射的盲区等问题。这使许多基于波动方程的叠前深度偏移方法应运而生。时间—空间域(或频率—空间域)的有限差分深度偏移成像方法,频率—波数域和频率—空间域的各种广义深度偏移成像方法的出现,标志叠前深度偏移已发展到第二阶段。理论和实践都已证明,在复杂构造地区基于波动方程的叠前深度偏移成像方法要比基于几何射线理论的 Kirchhoff 积分深度偏移成像方法成像效果好,但目前要解决的问题是如何减少波动方程深度偏移成像过程中的巨大计算量,提高计算效率。面炮技术在这方面作了一些探索。前面所述的深度偏移成像方法都是基于声波层状介质,是一种波动方程近似偏移成像方法。在第三阶段,深度偏移成像方法研究的将是全三维叠前弹性波波动方程深度偏移,实现真介质(离散介质)的深度偏移成像,地下构造的成像精度将会极大提高。

随着深度偏移成像方法的发展,其速度模型建立和速度模型修改也得到了巨大的发展。从最初采用 DIX 公式将叠加速度转换为层速度,发展到采用相干反演以及层析成像等手段获得层速度,使建立的速度模型的精度和可信度大为提高。最科学的建立速度模型的方法是采用神经网络等手段,并在建立速度模型过程中充分利用其他地球物理信息及地质信息。

各向异性介质成像技术也有很大的发展。

4. 解释技术

近年来,随着科学技术的迅速发展,在石油、天然气勘探领域中,地震资料解释和地质综合研究技术有了飞速发展,新技术新方法层出不穷,以地震相干解释技术、地震相分析技术、波阻抗反演技术、三维可视化解释技术等为代表的一系列新的地震解释技术在实际工作中得到了全面推广应用和发展。现今的地震资料解释已不仅仅满足于常规的构造解释,它更倾向于以地震信息为主,借助先进的解释技术,开展储层特征综合分析、油气藏分布规律等更深层次的研究。

(1)3D 可视化技术。可视化技术是把描述物理现象的数据转化为图形、图像,并运用颜色、透视、动画和观察视点的实时改变等视觉表现形式,使人们能够观察到不可见的对象,洞察事物内部结构。方法包括以图形为基础(或称为面可视化)和以体素为基础(体可视化)的可视化。在以体素为基础的体可视化中,每一个数据采样点被转换成一个体素(一个 3D 像素的大小近似于面元间隔和采样间隔)。每一个体素有一个对应于源 3D 数据体的值,一个 RGB(红色、绿色、蓝色)色彩值以及可被用来标定数据透明度的暗度变量。在 3D 图形工作站环境支持下,各种基于数据体操作、图素提取与曲面造型、体绘

制技术的应用软件相继出现。体可视化允许解释人员直接进行地层解释,识别地震相,改进油藏特征描述。它通过数据的 3D 立体显示,使解释人员能够作构造、断层、地层沉积、岩性、储集参数和油气等的交互解释。解释结果在三度空间内立体显示,可以激发资料处理解释人员的科学灵感,赋予他们无限的想象空间与创造力,极大地提高了工作效率和工作质量。三维体显示技术的优势:

1) 可以对整个三维数据体进行显示成像而无须对数据进行先验结构假设,保存了三维显示技术可能丢失的关于三维体的细节,特别是内部结构细节。

2) 允许对数据体内部结构进行观察,解释人员可以通过设置暗度/透明度来“看透”一个目标的外表面,以观察其内部结构;可以过滤掉某一值域内的体素来观察所剩下的体素。

3) 可利用目标方式或组合方式实现三维显示,即体素从它们所处的层开始被投影,以从后向前的顺序到达图像平面,然后与它的层面组合成一个二维平面,这种方式允许解释人员在屏幕上观察由层面所构成的图像,可以看到所建立的三维体内部结构,并通过停止或慢速显示以更好地检查当前显示结果。

三维可视化技术的引入,使广大地球物理工作者和地质综合研究人员从传统的二维平面中解放出来,并进入到神奇的三维空间内,这极大地激发了科技人员的灵感,并赋予他们无限的想象空间和创造力,其思维方式也会发生质的飞跃,将会发现三维可视化技术是一项前所未有的解释新技术。

(2)地震相干解释技术。地震相干解释技术就是利用地震波形相干原理,计算中心地震道和指定相邻道的相干系数,将普通地震资料转换成相干系数资料,以突出地震资料中的异常现象。该技术能快速建立起断裂系统、特殊岩性体的空间展布形态,指导岩性体和断层的剖面解释及平面组合。

(3)地震相分析技术。地震信号的任何物理参数的变化总是反映在地震道形状的变化上,而地震道形状的变化则与地下地质信息的变化相对应。地震相分析技术中的地震相分类处理就是建立在地震道形状的变化变化的基础上。在地震地层解释技术应用中,首先是在地震剖面的目的层附近选一定的时窗,即地震层段,使用神经网络算法在地震层段内对实际地震道的形状进行处理,经过多次迭代运算,形成合成地震道,也称为模型道,实际地震道与合成地震道进行比较,将实际地震道最终划分为不同的类别,即完成不同的地震相划分。地震相分析技术所拥有的基于神经网络算法的地震相分析技术,可对全新概念的“地震层段”进行分析、比较,在波形形状识别的基础上实现全三维地震相提取,有利于沉积环境研究及沉积微相的划分;完善的沿“地震层段”的属性提取技术及基于波形的全三维自动追踪技术,实现了从剖面到地震数据体的快速浏览与分析,为油气模式的识别提供了依据。

(4)地震波阻抗反演技术。在地震资料解释过程中,经常提到的反演技术就是指波阻抗反演,该技术是 20 世纪 70 年代早期由加拿大的 Technika Resource Development 有限公司的 Roy Lindseth 博士研发的。波阻抗反演技术是将常规的地震反射振幅的横向变化,转变为速度的横向变化,从而把界面型的地震剖面转换成岩层型的层速度剖面,由此来反映储层横向变化规律。

5. 油藏地球物理技术

随着油气藏勘探开发的不断深入,油藏地球物理技术不断向油气田开发领域延伸,使得该技术已经成为油气田开发与生产的一种重要技术手段。油藏地球物理技术因油气田开发与开采的需要而兴起,以美国为代表的西方国家对其进行了较长时间的探索研究。1977年,美国能源部资助斯坦福大学开展油藏地球物理基础研究;20世纪80年代,SEG专门成立了开发与开采委员会,每年召开专题研讨会,推动油藏地球物理技术的发展;进入90年代,油藏地球物理技术得到了长足的进步,发展至今油藏地球物理技术已经涉及岩石物理、油藏建模、油藏描述、油藏管理、油藏监测、油藏开发及经济评估等诸多方面,已在世界范围内得到广泛应用并不断带来巨大的经济效益。

油藏地球物理技术的概念可以定义为:在充分利用已知油藏构造、储层和流体等信息的基础上,开展有针对性的地震资料采集、处理和解释研究,全面提高油藏构造成像、储层预测和油气水判识的精度,为油藏三维精细建模、调整井位部署、剩余油分布预测服务,最终实现油气田高效开发的目标。油藏地球物理与勘探地球物理的最大区别在于油藏地球物理用于已探明的油气藏,工区内至少有一口井及其相关资料,服务对象是油藏的开发与生产。

在油气田开发阶段,油藏地球物理的主要任务是建立三维概念模型和三维静态模型,包括精细构造形态、储层横向变化、油气分布范围等,目的是探明资源,优化井位。在开采阶段,油藏地球物理的主要任务是开展动态油藏描述研究,不断深化对油藏的认识,建立三维动态油藏模型,为剩余油分布预测、开发措施调整提供地质依据,目的是发现剩余资源,实现高效开采。由此可以看出,油藏地球物理的研究目标更加明确,地震资料采集、处理和解释的方法更有针对性。其技术特点是精度要求高,基本单元小,与动态结合紧密,可验证性强,数据量大,数字化程度高。

地震解释技术发展到现在阶段,地质学家已经不再满足于用地震资料解决构造问题,他们更希望地球物理学家利用地震资料解决断层、储层发育带、岩相模式及碳氢指示等一系列岩性和油气的预测问题。因此,未来的地震解释技术将会得到更大的发展,将紧紧围绕油气藏这一最终目标,开展地震资料的综合解释及研究工作。

(二) 综合物探技术

1. 电法勘探技术

电法勘探是目前在固体矿床和油气勘探中运用较多的非地震勘探方法,它的物性基础是介质电阻率的差异,它有良好的垂向分辨率和分层能力。电法勘探大多属于主动源方法,能选择不同的观测系统对目标体进行多方位激发,能有效地获取空间形态及电性特征。目前,在油气勘探领域,应用较多、效果较好的电法勘探方法主要是:固定源建场测深法、电磁阵列剖面法、大功率激电测深法、井中电磁勘探。电法勘探的主要问题是采集干扰和高维电磁问题的求解及反演。目前的方法是加大发射功率、实施远参考测量、数字滤波分析等,高维电磁的求解问题需要高性能的计算资源支持。

2. 磁法勘探技术

磁法勘探是应用最广泛、最轻便、效率高、成本低的物探方法,磁法也是最古老、理论上最成熟的物探方法。按工作空间划分,可以分为航空磁法、地面磁法和井中磁法。微磁或激发极化等就能发现近地表的蚀变带以及油气藏周边的环状异常,探测到油气藏的部分信息。目前磁法勘探主要有传统地面磁法、连续正交地面磁测法、连续正交低空磁测法、连续正交车载磁测法。连续正交地面磁测法是指测网正交、测量精度优于 1.0nT 的步行动态连续记录的磁场测量。使用的仪器为分辨率为 $0.005\sim 0.05\text{nT}$ 的光泵磁力仪和同步观测的 GPS 导航定位系统。测网正交是指正交纵横双向观测法,就是在正交网上先进行一个方向的观测,再进行另一个方向的观测,最后采用节点平差法获得观测值。连续正交地面磁测方法在测量方面主要得益于 GPS 技术的进步。

美国生产的 Lacoste D 型地面重力仪精度可达 $5\sim 10\mu\text{Gal}$,比 20 世纪五六十年代提高了近百倍;G858 光泵磁力仪精度可达 0.005nT 以上,与早期几个甚至几十个 nT 的磁力仪相比提高了近千倍,而且采用连续自动记录存储方式。GB-4A 氦光泵磁探仪是 GB-4 氦光泵磁探仪的改进型产品,是一种航空高精度磁异常探测器,适合于航空地球物理勘探中高精度航磁测量。它是利用光泵亚隐态原子的磁共振特性来探测总磁场强度变化的。采用多光系方案来克服光轴与外磁场夹角变化带来光学信号的变化,使仪器在全球范围内都可正常工作。其主要特点如下:

(1)仪器采用正交三光系氦光泵探头,在全球范围内,各种航向机动力飞行时都能正常工作。仪器设计时采用了宽带倍频电路和数字倍频相结合的技术,因此在测量精度达 0.02nT 时采样率达 10 点/秒,而且还设计了 5 点/秒和 2 点/秒,共三种采样率,可根据实际需要选择合适的采样率。

(2)使用高性能单片微型计算机扩展功能,提高整机的性能。CF 卡数据存储,容量达 64M 以上,随机配置 64M 容量的 CF 卡可连续存储约 270 小时的数据(按 2 点/秒的采样率计算)。

(3)高灵敏度磁探仪安装在飞机上使用时会受到飞机磁场的干扰。针对主要的 9 项磁干扰,将 9 项磁补偿器集成在同一机箱内。用于补偿由飞机引起的永久感应和涡流磁场。

(4)主要技术指标:磁测程为 $30000\sim 70000\text{nT}$;显示精度/读出速度为 $0.02\text{nT}/0.1\text{秒}$ 、 $0.01\text{nT}/0.2\text{秒}$ 、 $0.005\text{nT}/0.5\text{秒}$;静态噪声 $\leq 0.01\text{nT}$;显示方式为 LCD 智能型;数字输出接口为 RS-232;模拟输出接口: $0\sim 5\text{伏}$,或 $0.05\text{nT}/\text{mV}$;方位误差: 1.5nT ;二台一致性 $\leq 0.05\text{nT}$;存储容量 $\geq 64\text{Mb}$;工作温度为 $-10\sim +50^\circ\text{C}$;电源为 $27\text{V}\pm 10\%$,且 $\leq 3\text{A}$ 。

3. 电磁法勘探技术

(1)MT 电磁法勘探技术要作为一种勘探手段,需要提高在纵向分辨能力、获得较多的反映目标的信息数量和强度。随着所采集的电磁场感应数据在空间密集性和精确性上的显著提高,如何根据地面上所观测到的不同频率的电磁场的响应函数来对地下复杂介质构造实现快速、准确的电性参数成像的研究,是目前电磁法勘探以及其反演研究的前沿

课题。电磁偏移成像技术。电磁场偏移就是研究观测电磁场的上行波场,是以反向扩散传播方式使各个场源逐渐归位的。若向下传播的偏移场的相位与原来上行波场的相位在介质的分界面上相同,通过电磁场偏移成像就能够恢复地球内部反射场的相位,从而达到成像的目的。它不是将扩散场变成波场,而是在扩散方程的条件下,将波场分析的原理变成对电磁场的解释,形成电磁场偏移方法。

(2)全频段有限差分大地电磁多参数偏移成像的实现。全频段有限差分大地电磁多参数偏移成像技术克服了原单频段偏移成像方法中选择频段的人为性和非全面性等不足,可根据研究目标和计算的需要组合频段,对观测范围内的所有频点(如 320~0.00055Hz 观测频率范围)进行叠加成像,不仅可以保证突出重点频率段的信息,还可以反映高频段、过渡段和低频段等所有频段的综合信息,因此使计算结果所包含的频率信息更加丰富和全面,成像结果可更客观准确地反映复杂地下介质的电性变化,从而提高了成像在纵、横向上的分辨率。电磁勘探仪器的更新快,主要得益于对地震仪成熟技术的大量移植。目前,电磁勘探仪器的精度可达 $0.1\mu\text{V}$,其动态范围、采样率与地震仪指标没有差别,如 24 位模数转换、无线电或 GPS 同步方式等技术与地震仪相同。

(3)固定源建场测深。固定源建场测深是一种强源时间域电磁感应测深方法(TEM),其最大特点是采用一个相对固定且比较强大的脉冲电流源,以多道数字采集系统在几十至几百平方千米范围内实行密集布点的采集方法,从而提高了施工效率和勘探的详细程度。同时,由于采用了时间域叠加和空间域的多次覆盖技术,使得它的成果在某些方面能与地震资料相媲美。该方法最先在俄罗斯建立发展并应用,在油气普查、详查乃至储层电性探测各个方面都取得过重要成果。近几年来,欧美也竞相发展这项技术(又名 LOTEM),目前已具备生产能力。

(4)连续阵列大地电磁勘探。大地电磁测深法(MT)作为一种有效的油气地球物理勘探方法在国内外获得了广泛应用。由于 MT 方法是利用天然变化的电磁场源,不需布设人工源,因此野外施工简便,成本低廉,此外还具有探测深度大,不受高阻层屏蔽影响,对低阻层有较高的分辨能力等优点。但 MT 方法存在两大致命缺陷:①由于 MT 实施单点观测,由近地表电性不均匀体及起伏地形所引起的静位移严重;②在干扰地区,数据质量难以提高。连续电磁阵列勘探就是针对常规 MT 方法的弊端,近年来提出并发展起来的一项很具特色和富有生命力的新方法。它的主要特点就是在传统 MT 观测的基础上,沿测线进行高密度连续电场信号采集。CEMAP 方法较小的空间采样间隔和对场的连续采样避免了常规 MT 测量所常见的空间采样不足的问题,大大地扩大了大地电磁信息量,可以获得地下电性结构的连续变化图像,提高了数据质量和对地电结构的分辨能力。同时,可通过对电场信号的密集采样,实施空间波数域低通滤波特殊处理,压制甚至消除近地表电性不均匀体及起伏地形所引起的静态效应。随着电子及信息技术的发展,目前 MT 仪器均采用 GPS 定位和进行多站同步观测,仪器体积小、轻便,为 CEMAP 技术的密集采样和全张量观测提供了硬件保障。CEMAP 具体的野外观测方式是由许多首尾相连的电极对沿测线作密集的空间采样,同时在各测点采集多道大地电磁场分量(3 磁、2 电),并布设远参考点,这样构成一个连续的、全张量的观测系统。

在资料处理解释方面,借助于远参考技术和 ROBUST 分析技术,大大提高了数据质

量;基于空间波数域低通滤波处理,有选择地衰减由于地下浅部非均匀体和地形高差起伏变化而造成的传导电流效应,压制静位移的影响;采用带地形的反演技术和模拟地震偏移成像技术,提高结果的可信度和对地下电性分布的纵、横向分辨能力。

(5)井间电磁技术。井间电磁一直吸引着电磁专家的研究热情,在近年的 SEG(勘探地球物理年会)上专列了一个电磁跨孔成像的专题,这足以说明井间电磁技术的研究热度和应用前景。由于地层的电阻率随温度、孔隙率、饱和度等储层参数的变化远比速度随这些因素的变化灵敏得多,井间电磁可望成功地应用于油藏描述、追踪蒸汽驱动、监测盐水流向等方面。目前井间电磁最大的困难在于钢套管井的数据采集。新近的研究表明:钢套管的衰减作用是传感器周围钢管的厚度、电导率和磁导率的简单函数,如果知道钢套管性质,则可以容易地从总场中把其分离出来,而把地层的电磁响应保留下来。最近,在加州 Richmond 测点采集的数据对钢套管对感应场的影响的定量分析也表明,这种影响是可以被区分出来的。该测点处有相邻的钢管井和塑料管井,在此进行的电磁频率测深表明低频(1.0~50Hz)测量是把套管响应与地层响应分开的一种有效方法,而且钢管对感应线圈的影响是非常有限的,可以被限制在线圈附近 0.3m 的范围内。因此,井间电磁技术向前迈进了一步,但离实际应用还有一定距离,研究将会继续。另外,近来还提出了一种直接用钢套管井作为电极的井间电阻率成像方法(ERT),可进行开采监测。在两井间作排列采集,然后对井间的电性分布成像,从而描述蒸汽驱动的轨迹。该方法可以达到更大的深度和更大的井间距,但成像的精度比较低。

4. 重力勘探技术

重力勘探是应用最早和最为广泛的物探方法之一,并且相对比较简单,用一般的微机或工作站就能完成实际资料的处理解释。目前重力勘探的关键技术是测点周围地形影响和目标异常的识别和分离。对于地形影响,由于它只局限于测点周围的有限区域,通过测点位置的合理选取,特别是近年来发展起来的数字地形及变密度密集网地形改进技术的发展和运用,重力地改已基本得到解决;对于异常分离,从物理上分析,由于引力场满足位场泊松方程,具有可叠加性。理论上讲,观测到的重力场应是从地表至地球中心间所有密度差异而引起的。由于引起重力异常的因素众多,地下各种地质体异常叠加在一起,再加上重力场的多解性,因此,重力勘探的实际应用效果受到很多限制。重力资料的处理解释能否取得良好效果的关键在于探区内引起重力异常的因素是否较为单一,或者能否将不同地质体引起的异常加以分离。

一般而言,重力勘探具有良好的水平分辨能力,异常图上的阶梯带可以确定断裂的位置,延拓不同高度可以大体估算异常体的延伸及其深度,而不同方位的方向导数能够帮助判断平面上异常体的展布。然而,它的垂向分辨能力很差,需要利用钻探或反射地震资料进行检验与控制。重力勘探作为油气普查的常规物探方法,当前除继续用于研究结晶基底,确定沉积层厚度,圈定较大背斜构造及识别断层,解决盆地结构、拗陷分布、地层分布等基本的地质问题外,越来越多地通过提高测量精度或通过改进观测、处理方法来提取有用的低值异常,从而更详细地研究与油气藏有关的沉积构造与密度的不均匀性。

重磁力梯度测量实际上是重磁场的某些空间导数,显然具有更高的分辨率。随着仪器技术的进步,以及三维地震与重力联合反演技术的发展需要,三维全张量重磁力梯度仪

器测量技术近年被推出,并显示出其独特的作用。三维磁力梯度测量主要应用于航空磁测。而三维全张量重力梯度测量技术发源于美军核潜艇上无源无声探测技术的需要。这种全张量重力梯度仪器由 12 个加速测量仪构成,它们分装在三个旋转盘上,每个盘上的 4 个加速度测量仪构成 2 个正交对,三个旋转盘之间互为 120° 交角,旋转盘可以消除线性运动感应误差,使误差和噪声达到最小。三维全张量重力梯度测量可以反映场源几何形态的不同信息,较之传统方法来说大大提高了重力勘探的分辨率。重磁力梯度,特别是重力全张量梯度测量,是近年来重力勘探技术的新进步。在油气勘探开发阶段,进行时移微重力测量,特别适用于具有高孔隙度油气田的开发监测,是四维地震勘探的有效补充,必将对提高解释精度发挥重要作用。

5. 航空勘探技术

航空勘探技术近几年国外发展较快,方法较多。国外主要航空物探公司都有航空磁力梯度测量系统,磁力仪主要是 CS-2/CS-3 或 G-823A 铯光泵磁力仪,补偿系统主要是 AADC-2 数字实时补偿仪。目前国外用中小型飞机装备的全轴梯度系统的动态噪声水平大致为:水平梯度在 $1\sim 10\text{pT/m}$,垂直梯度在 $5\sim 20\text{pT/m}$ 。发展方向:高精度、数字化、集成化。航磁三分量测量技术静态条件下的磁矢量(三分量)的测定主要有:磁通门式、补偿式、超导式。磁通门式磁力仪精度有限,目前能达 0.1nT 左右,且有较大的转向差。

补偿式磁力仪通过对高灵敏度光泵探头或核旋探头进行分量补偿的技术,可依次测得磁矢量的三个分量,通过稳定的恒流源技术可达到比磁通门仪器较高的灵敏度。

超导三分量磁力仪可直接测量磁矢量的三个分量,灵敏度比前两者要高,但制冷系统复杂、笨重。高分辨率航磁在找矿中,能够快速有效地对矿产勘查远景区进行评价,更好更快地进行勘查选区,直接发现与矿和可能与矿有关的异常,识别构造细节,分辨细小的断层与裂隙,对岩石边界进行精确填图,区分杂岩单元,穿透沉积层对下伏基岩或侵入岩体进行填图,较准确圈出隐伏地质体的空间分布状态;计算资源量,为科学布钻提供了依据。

三、我国油气地球物理勘探发展现状分析

(一) 地震勘探技术

在国外油藏地球物理技术进步的带动下,国内油藏地球物理技术也得到了不断发展。1989 年原石油部在勘探开发科学研究院成立了地震横向预测研究中心。经过多年的努力,形成了以地震反演、AVO、地震属性分析等技术为手段,地震、地质、钻井、油藏工程等多学科综合研究为特色的储层地球物理技术系列,迈出了我国油藏地球物理研究的第一步。随后在 50 多个油藏进行了实际应用,取得了显著的社会、经济效益,在石油行业起到了导向、示范的积极作用。1996 年我国出版了第一部系统论述油藏地球物理方法的专著《油气田开发地震技术》。近十年来,我国的油藏地球物理研究取得了长足的发展,在复杂油藏精细描述方面取得了明显进步,形成了以大庆油田为代表的多层砂岩油藏精细描述技术,以大港油田、冀东油田为代表的复杂断块油藏精细描述技术,以及以吉林油田为代

表的低渗裂缝油藏精细描述技术。同时,在多波地震、井筒地震和四维地震等方面也有了一定的技术积累,为油藏地球物理技术的进一步推广应用奠定了良好的基础。

(二)综合物探技术

目前国内应用最为广泛、效果也较好的重磁电震联合处理解释软件有石油大学开发的EMAP法(MT)处理解释软件。EMAP法(MT)解释的基本思路是:在资料预处理(编辑、圆滑、静位移校正、极化模式判别)的基础上,进行资料定性分析,结合地质资料 and 不同地质体的电性特征,建立反演计算模型,确定电法地质剖面。

综合物探仪器方面,航空物探核心技术快速提升,调查能力显著增强,自主创新研制出多种具有国际先进水平的航磁测量仪器,并广泛用于国土资源大调查。如:HC-2000 氦光泵磁力仪、DSC-1 航空磁测数字自动补偿仪 & 数据收录系统、航磁水平梯度系统、小型航空物探系统、航磁全轴梯度测量系统。我国还成功研制直升机磁、放测量系统用于危机矿山找矿。最新引进集成直升机航空电磁、磁测量系统,在矿产勘查中发挥了重要作用。引进集成具有国际先进水平的航空重力测量系统,具备了实际生产能力。改装了三种测量飞机 5 套测量系统。每年投入测量的有 8~10 套系统,工作量达 40 万~50 万 km。其中:C-2000 氦光泵磁力仪,航磁梯度仪;SC-1、AADC-II 补偿仪,实时数字磁补偿;记录灵敏度:0.01~0.0003nT(0.3pT)。

(三)油藏地球物理技术

近年来,我国取得了巨大进展,如针对大庆油田的多层薄互层、大港和冀东油田的复杂断块形成的精细油藏描述技术等都取得了突出的成绩。但与国外相比仍有较大的差距。

(1)基础研究投入不足,尤其是在岩石物理基础和新理论与新方法研究等方面,方法的针对性还不强,影响技术效果的发挥。

(2)技术缺乏系统性,如叠前反演、井间资料处理和解释、多分量资料处理和解释以及四维地震与油藏数值模拟的一体化解释等。

(3)对横波测井资料的作用认识不足,资料少,应用不充分,制约地震前缘技术的发展。

(4)开采地球物理发展慢。近年来,开发地球物理取得了巨大进步,形成了特色技术,但在开采地球物理的研究和应用上还有较大差距,尤其是技术的引导作用有待加强。

为此,我们应加强对油藏地球物理重要性的认识,不断完善技术系列,提高我国油藏地球物理技术水平。具体做法包括:推广适用技术,如精细油藏描述技术;攻关“瓶颈”技术,如叠前地震反演技术;强化前缘技术,如井筒地震技术、多波多分量地震技术、四维地震和微地震等技术的研究力度。同时,需要深化对油藏地球物理有效性的认识,包括适用性、局限性以及技术可行性和经济有效性等。总之,为适应地球物理技术的发展趋势,我国地球物理工作者应紧紧抓住这种机遇,克服以上差距,奋起直追,进一步发展具有中国特色的油藏地球物理技术,为中国石油的开发生产提供重要的技术保障。