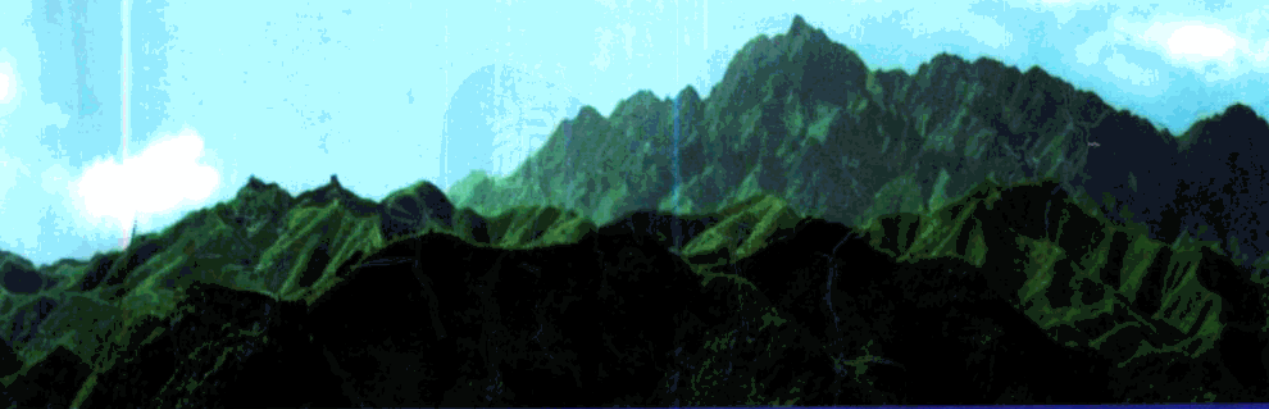


山 地 地 球 物 理 勘 探 技 术

阎世信 等编著



石油工业出版社

序 一

经过几十年的实践研究,山地地球物理勘探技术已取得了长足的进展。虽然还有许多复杂的难题有待解决,但总体上已基本形成了一套较成熟的野外采集、室内处理和综合解释的技术方法。为了促进和推广这一技术,非常有必要从理论到实践进行总结。

我国陆上新区的油气勘探以高难度和高风险为特点,特别是南方碳酸盐岩裸露区和西部高原、沙漠以及盆地边缘山区,地面地震地质条件很差,地下构造形态复杂,山地物探施工十分困难。原中国石油天然气总公司勘探局新区勘探事业部及其相关单位,组织有关物探公司或地调处对山地复杂有利区(包括藏北高原在内的一些难度很大的盆地和地区)开展了大规模的物探工作,在久攻不克的一些工区和领域取得了丰富的地质成果和认识。

本书作者正是在这一背景下,在多年的山地物探技术管理工作中,不断地学习、吸收和总结新鲜技术和经验,利用两年多的业余时间,编写了这本《山地地球物理勘探技术》,系统地阐述了山地地球物理勘探数据采集、处理和解释三大环节,并剖析了一些勘探实例,这对我国陆上地球物理勘探技术的进步不能不说是一个促进和提高。



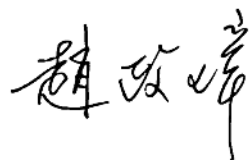
2000年5月12日

序 二

“八五”以来,我国石油工业进入了一个新的历史发展时期,随着勘探工作的不断深入,勘探难度越来越大。勘探工作的重点和注意力相当一部分已被迫转向了地面施工条件较差的南方山区和中西部沙漠、黄土塬以及戈壁山地。

这些地区不仅地面施工条件较差,而且地下地质情况复杂,同时又远离经济发达地区。如何依靠先进实用的物探技术搞清地下地质结构,落实钻探目标,以此提高勘探效益,不断有新的战略性发现,一直是勘探工作者密切关注的问题。多年来的勘探实践表明,没有物探技术的突破,要在这些地区开拓新的勘探局面是不可能的。

本书作者在多年现场生产技术管理的基础上,经过认真总结,编著了这本《山地地球物理勘探技术》,从山地物探资料采集、处理一直到解释,进行了详细论述,特别是解剖和总结了勘探工作过程中的许多实例,这是一件非常有意义的事情。相信从事山地油气勘探的有关人员会从中得到许多启发和收益,在此基础上锲而不舍地进行探索,为我国复杂山地油气勘探工作的不断发展做出新的贡献!

A handwritten signature in black ink, reading '赵刚' (Zhao Gang) in a cursive style.

1999年12月20日

前 言

大量资料表明,世界上半以上的石油资源蕴藏在海相碳酸盐岩地层中。我国“印支旋回”以前的海相碳酸盐岩分布面积约为250万 km^2 ,占全国沉积岩面积的二分之一。南方十四省碳酸盐岩山地分布面积约为149万 km^2 ,有利勘探面积在76万 km^2 以上,沉积岩厚度达6000m,发育有下寒武统、下志留统、上下二叠统和下三叠统4套主力烃源岩。全国二次资源评价认为石油资源量、天然气资源量分别在40亿t和4万亿 m^3 以上。经过40余年的山地物探技术攻关积累了大量的山地物探资料和经验,取得了丰富的地质成果。除四川盆地累计探明5000亿 m^3 天然气外,在滇、黔、桂、鄂、苏、皖、琼七省区也已发现了油气田,油气资源丰富。累计已经探明石油、天然气地质储量2亿多吨和几百亿立方米。

我国西部广大地区多数盆地与周缘造山带之间均为高陡构造山区,这些地区油气资源潜力大,但一般地表地形陡峭,条件恶劣,地下地质条件非常复杂,地层倾角陡,新老地层倒置,甚至出现双重构造,使得物探作业条件更为困难。我国西部山地物探从50年代开始,先后发现了老君庙油田、玉门油田、准噶尔南油田、塔西南油气田、塔北克-伊油气田、吐哈吐玉克油田等。

大量事实证明,山地地球物理勘探技术是南方海相地层油气勘探和西部海陆相地层油气勘探能够取得重大进展的关键技术。

“八五”之前,四川石油管理局地调处、江汉石油管理局物探处和滇黔桂石油勘探局地调处在大山区已经做了大量地震工作,并取得了显著成绩。1993~1998年,原中国石油天然气总公司勘探局新区勘探事业部为贯彻落实“稳定东部、发展西部、油气并举”的石油工业发展战略,加快南方和西部勘探步伐,准备战略接替区,在滇、黔、桂山区,川、鄂、湘中上扬子及皖苏下扬子广大南方碳酸盐岩分布区及火成岩覆盖区,新疆、青海、西藏等碎屑岩覆盖区的有关盆地进行了大规模的地球物理勘探工作,历时六年有余,极大地推动了山地物探技术的发展。参加野外采集、处理、解释攻关和施工的单位主要有石油地球物理勘探局、四川石油管理局、江汉石油管理局、胜利石油管理局、新疆石油管理局、滇黔桂石油勘探局、青海石油管理局等,初步摸索出了一套复杂地表区的表层调查、山地二维地震激发和接收方法、静校正量计算和基准面选取、叠前和叠后去噪、速度分析、叠加成像和偏移成像处理方法;研究和开展复杂地表区和碳酸盐岩出露区的三维勘探技术;探索碳酸盐岩储层解释及灰岩裂隙、溶洞、礁块的识别预测方法,利用多种物探和地质信息进行综合解释,实现处理解释一体化,取得了一批重要勘探成果,初步形成了一套山地勘探技术和方法。鉴于山地地质条件复杂,还有许多地区物探资料

质量仍不能令人满意,还需进一步攻关。但是,随着高新勘探技术和方法日新月异的发展,我们相信山地物探技术将会取得新的飞跃。为了总结山地物探技术,发展山地物探理论,给今后的山地勘探提供经验,作者在工作之余,编写了这本《山地地球物理勘探技术》。

在本书的编写过程中,陆邦干、赵化昆总工程师及石油地球物理勘探局有关专家审阅了书稿并提出了许多宝贵意见。川鄂湘项目经理部姚雪根、夏克忠、杨再旗、魏新善、王正元、杨治楷,四川石油管理局地调处朱北舜、胡奇谋、孙建库、胡一川、蔡元贵、伍志明、张明德、杨忠明、曾维君,江汉石油管理局物探处陈以顺、曾祖泽、杨玉军、周芝旭、张刚雄、李建明、曾祥华等同志给予了热情的指导和帮助,并提供了有关资料。本书的出版得到了江汉石油管理局物探处和四川石油管理局地调处的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

1999年12月于北京

目 录

1 绪论	(1)
1.1 开展山地地球物理勘探的意义	(1)
1.2 山地地球物理勘探特点	(3)
1.2.1 地表条件复杂	(3)
1.2.2 地下构造复杂	(4)
1.2.3 碳酸盐岩储层预测困难	(4)
1.2.4 成本高、生产效率低	(4)
1.3 山地地球物理勘探内容	(5)
2 山地地震勘探采集技术	(6)
2.1 山地地震勘探装备	(6)
2.1.1 测量仪器	(7)
2.1.2 钻机	(7)
2.1.3 震源	(11)
2.1.4 遥测数字地震仪	(13)
2.1.5 运载工具	(14)
2.1.6 现场处理系统	(15)
2.2 地震采集方法论证	(15)
2.2.1 建立模型	(15)
2.2.2 激发	(22)
2.2.3 接收	(26)
2.2.4 观测系统	(27)
2.2.5 山地三维采集设计	(30)
2.3 低、降速带调查	(34)
2.3.1 双井微测井	(35)
2.3.2 常规浅层折射	(35)
2.3.3 新的浅层折射法	(36)
2.4 干扰波调查	(37)
2.5 激发因素选择	(40)
2.5.1 合理布点优选激发深度	(40)
2.5.2 砾石区采用浅井组合	(41)
2.5.3 砾石区采用单深井激发	(41)
2.5.4 巨厚砾石区采用可控震源	(43)
2.6 检波器面积组合接收	(45)
2.7 观测系统选择	(46)
2.7.1 分辨率与偏移距	(46)
2.7.2 排列长度	(47)
2.7.3 组合基距	(48)
2.8 覆盖次数选择	(50)

2.9 高精度测量	(52)
2.9.1 测量精度要求	(53)
2.9.2 GPS 高精度测量	(54)
2.10 现场处理方法论证和质量控制	(56)
3 山地地震勘探处理技术	(59)
3.1 复杂地表区静校正	(62)
3.1.1 基准面选择	(63)
3.1.2 高程和低速带静校正	(66)
3.1.3 折射波静校正	(69)
3.1.4 高精度剩余静校正	(81)
3.2 提高信噪比和分辨率处理	(84)
3.2.1 信噪比和分辨率的关系	(84)
3.2.2 常规提高信噪比和分辨率的方法	(90)
3.2.3 波形一致性处理	(92)
3.2.4 最佳规则干扰衰减滤波	(108)
3.2.5 分频信号加强滤波	(114)
3.3 速度场建立	(122)
3.3.1 精细速度分析	(122)
3.3.2 重新解释速度谱	(123)
3.3.3 新的层速度计算方法	(125)
3.3.4 层速度平滑	(129)
3.3.5 速度场校正	(129)
3.3.6 速度场建立	(129)
3.4 复杂构造成像	(131)
3.4.1 高精度叠加成像	(131)
3.4.2 超临界角反射成像	(144)
3.4.3 偏移基准面选取	(147)
3.4.4 偏移成像	(148)
4 山地地震资料综合解释技术	(155)
4.1 层位确定(仿真测井)	(156)
4.1.1 地面地质调查和岩样采集	(156)
4.1.2 岩样室内测试	(156)
4.1.3 仿真钻井剖面	(157)
4.1.4 制作仿真合成地震记录	(158)
4.1.5 地震反射仿真层位确定	(158)
4.2 平衡剖面	(158)
4.2.1 地震剖面构造特征	(159)
4.2.2 生长断层转折褶皱	(159)
4.2.3 生长构造模型	(160)
4.3 变速成图	(160)

4.3.1	常规作图法	(160)
4.3.2	变速空校法	(161)
4.3.3	变速成图法	(163)
4.4	压力预测	(170)
4.4.1	计算公式	(170)
4.4.2	各项参数求取	(171)
4.4.3	精度分析	(171)
4.4.4	地层压力预测缺陷	(172)
4.4.5	地层压力预测的改进	(173)
4.5	地震资料处理解释一体化	(174)
4.5.1	叠后处理改善资料品质	(174)
4.5.2	相干信息提取及应用	(174)
4.5.3	地震信息提取和复合显示	(174)
4.5.4	波阻抗反演	(175)
4.6	储层预测	(175)
4.6.1	石炭系储层预测	(175)
4.6.2	碳酸盐岩储层预测	(175)
4.6.3	生物礁预测	(178)
4.6.4	鲕滩预测	(178)
4.7	构造样式	(179)
4.7.1	昆仑山前构造样式	(179)
4.7.2	重庆石柱探区构造样式	(185)
5	山地综合物探技术	(191)
5.1	重磁勘探	(191)
5.1.1	重力场反映密度界面特征	(192)
5.1.2	重力场与区域构造	(192)
5.1.3	局部重力异常及地质解释	(192)
5.1.4	用重力归一化总梯度法检测油气	(193)
5.2	电法勘探	(194)
5.2.1	固定源建场测深	(194)
5.2.2	电磁阵列剖面法	(196)
5.3	地面地质调查	(205)
5.4	遥感测量	(206)
6	山地地球物理勘探实例	(209)
6.1	国外山地地震勘探	(209)
6.1.1	加拿大落基山脉山前带	(209)
6.1.2	意大利阿尔卑斯山	(209)
6.1.3	美国瓦尔弗迪盆地台地—山谷带	(210)
6.1.4	也门马西拉地区	(210)
6.2	重庆石柱山地二维地震勘探	(211)

6.2.1	地震勘探简史	(211)
6.2.2	地震地质条件	(211)
6.2.3	模型正演论证	(213)
6.2.4	偏移方法处理	(213)
6.2.5	高陡构造反射波场特点	(221)
6.2.6	攻关目标与对策	(222)
6.2.7	主要成果和认识	(224)
6.3	湖南桑石山地二维地震勘探	(225)
6.3.1	地震地质条件	(225)
6.3.2	试验方案	(226)
6.3.3	试验队伍、装备、工期和任务	(227)
6.3.4	采集试验过程和评价	(227)
6.3.5	效果分析	(229)
6.3.6	结论	(234)
6.4	湖北利川山地二维地震勘探	(235)
6.4.1	地震地质条件	(235)
6.4.2	野外施工方法和主要参数选择	(238)
6.4.3	采集试验	(238)
6.4.4	资料处理	(239)
6.4.5	资料解释	(240)
6.4.6	效果分析	(240)
6.4.7	结论	(240)
6.5	云南楚雄山地资料采集和质量控制	(242)
6.5.1	工区概况	(242)
6.5.2	地震地质条件	(243)
6.5.3	勘探简史	(244)
6.5.4	资料采集方法	(244)
6.5.5	难点分析和技术保障措施	(245)
6.5.6	质量指标	(247)
6.5.7	大姚地区推广应用	(247)
6.6	新疆昆仑山前山地球物理勘探	(248)
6.7	新疆塔西南海米罗斯山山地地震勘探	(255)
6.8	西藏羌塘盆地山地地震勘探	(259)
6.8.1	工区概况	(259)
6.8.2	野外资料采集因素	(260)
6.8.3	资料质量回顾	(261)
6.8.4	资料处理方法和流程试验	(261)
6.8.5	结论	(265)
6.9	新疆吐鲁番火焰山深层三维地震采集方法	(267)
6.9.1	工区概况	(267)

6.9.2	前期资料分析	(268)
6.9.3	测量方法	(269)
6.9.4	观测系统设计	(270)
6.9.5	激发与接收因素确定	(272)
6.9.6	无线中继技术的应用	(272)
6.9.7	静校正方法攻关	(272)
6.9.8	现场处理	(273)
6.9.9	初步效果分析	(273)
6.10	湖北建南气田山地重力、电法勘探	(274)
6.10.1	地表及地质条件	(274)
6.10.2	山地重力勘探	(275)
6.10.3	山地 MT 勘探	(283)
6.10.4	几点启示	(283)
	参考文献	(284)

1 绪 论

1.1 开展山地地球物理勘探的意义

山地是指相对平原而言的多山地区,它包括了低山丘陵、中高山脉和崎岖的高原等地区,在海相碳酸盐岩广泛发育的我国南方和西部,多为山地,山地地形约占全国陆地总面积的三分之二(见书后彩图 1-1-1)。

山地地球物理勘探在国内外已有几十年的发展历史,基本上形成了一套较为成熟的技术方法,并发现了许多油气田。但仍然还有许多山地区域,特别是以地表为碳酸盐岩出露,地下高陡背斜构造区为代表的地貌环境和地腹构造都十分复杂的地区,山地物探技术和方法尚未过关,仍属于世界性的难题。

国内山地物探工作,始于 1953 年在上扬子地台的四川境内以山地作业为主的地震勘探工作。虽然地形起伏大、坡度陡、植被茂密,交通条件差,但区内地表大部分为侏罗系地层覆盖,盆地内沉积相对稳定,地震反射特征明显,资料信噪比较高。1965 年原石油部组织 32 个地震队在川西、川西北、川西南和川东开展油气勘探大会战,为山地物探的发展奠定了基础。随后,在川东、湘鄂西、滇黔桂等地区陆续开展了山地物探工作。

在西部含油气区,即贺兰山—横断山以西地区,受印度板块挤压,盆地的构造特征属挤压型,呈北西西或近东西向展布。盆地周缘的一侧或多侧都以巨大的逆掩断层带或褶皱山系为界。山前带拗陷深、沉积厚,如昆仑山北麓和天山南、北麓山前形成的拗陷,其沉积岩厚度达 5000m 以上。山前带断层发育,并常伴有逆掩断裂带推覆构造、叠瓦状构造或排成带分布。山前拗陷斜坡上则广泛发育了地层、岩性圈闭或与构造相结合的复合型圈闭。

早期的石油勘探工作局限于地层露头较好、构造明显、油气苗较多的地区。由于当时条件的限制,勘探重点在盆地边缘的山前褶皱带、山前拗陷及山间小盆地。如最早建成、开发时间最长的老君庙油田,即位于祁连山北麓酒泉盆地的老君庙隆起带上。受祁连山北麓逆冲断裂的控制,老君庙隆起带上发育有青北断鼻构造和青草湾、鸭儿峡、老君庙、石油沟、大红圈等背斜构造。酒泉盆地先后发现了石油沟、鸭儿峡、白杨河及单北等油田。

位于天山和阿尔泰山之间的准噶尔盆地,其南缘发现了独山子油田,它和以后发现的齐古油田均位于乌鲁木齐以西天山北山前的逆冲断褶带上。在东起奇台、西至阿拉山口的整个山前拗陷,油气资源丰富。80 年代以后,在盆地东部的火烧山、沙丘河背斜带及帐北隆起等构造带上,找到了火烧山和北三台油田。博格达山前拗陷阜康断裂带中也发现了高产油气流。

50 年代,在天山南麓山前库车拗陷发现了南疆第一个油田——依奇克里克油田。近 10 年来在南天山山前的库车拗陷及整个塔北隆起上发现了十多个油气田,特别是 1996 年首次在克拉苏做了 200km² 山地三维地震以后,1998 年就发现了克拉苏特大气田,天然气储量高达 2000 多亿 m³。盆地西南边缘的叶城凹陷早在 1977 年就发现了柯克亚高产凝析油气田。在塔西南的喀什、叶城、和田等山前凹陷及整个铁克里克大断裂带上,均有良好的油气显示。显然,塔里木盆地周缘山地和山前带都是极有潜力的勘探区域。

吐哈盆地北靠博格达山,南有觉罗塔克山,西为喀拉乌成山,向东隐没于戈壁之中,属天山山间盆地,且在博格达山南缘逆掩推覆断裂发育。50 年代末仅发现了胜金口和七克台两个小

油田。80年代以来,在盆地内由北向南的推覆构造带中,先后发现了鄯善、丘陵、温吉桑、温西、丘东、米登、巴喀、鄯勒、疙瘩台等16个油气田或含油气构造。

40多年来,经过全国各石油勘探单位的共同努力,特别是1993年中国石油天然气总公司成立新区勘探事业部以来,把南方和中西部地区作为重点勘探地区,进行统一研究和部署,取得了一批重要地质成果,为战略展开奠定了良好的基础。其中在南方地区,至1998年累计完成地震测线约25000km,其中数字地震约18000km。但从整个南方海相古生界—中生界地层来说,原型盆地在古生代到中三叠世期间处于太平洋和特提斯域有利位置上,应当具有与世界其他太平洋和特提斯域类似的含油气特征和资源丰度。从目前各地发现的大量古油藏、1500多处油苗和钻遇古生界地层的井有一半以上都见到油气显示,充分说明南方油气分布是极其广泛的。在多次资源评价中,预测南方地区石油资源量在30~40亿t,天然气资源量有3~4万亿 m^3 。由于物探难度大,勘探方法尚未过关,因而勘探程度很低。到目前为止,在南方地区(除四川盆地外)以海相古生界—中生界地层为目标的地震勘探仅占全部地震勘探工作量的3%,在南方海相有利勘探面积达76万 km^2 的地区内,仍有80%的面积是地震勘探空白区。

纵观我国油气勘探发展的历史,可以说中国的油气勘探是从山地起步的。当时作出这种选择的主要原因是:(1)山地地表有丰富的油气苗显示,露头地层好、构造明显;(2)由于仪器、设备、技术、给养等方面条件的限制,没有能力上高山、下大海,以及挺进沙漠腹地;(3)石油地质理论和认识上的阶段性和局限性等。现在我国东部主要油气田都已进入开发中后期,稳产增储已相当困难;西部经过90年代的艰辛拼搏虽已找到了几个较大的油气田,但是南方众多盆地还一时难以找到期望的“大场面”。在这种情况下,加强南方和西部几个大盆地周缘山地和山前带的勘探势在必行,何况我国现在的仪器、设备、后勤支持能力、勘探技术和方法等方面均已取得了较大的发展和进步,完全有条件有能力加大山地勘探的力度。因此,应切实重视和加强山地勘探。

虽然,建国以来的勘探实践已使西部和南方海相地层的区域地质结构大致明朗。但要在比较有利的地区开展油气勘探,仍然需要进行物探技术方法的攻关。对于地表及地下条件均十分复杂的山地(特别是在石灰岩出露的低信噪比地区)物探工作,其成功的关键是寻求合适的地震装备、运载工具和物探数据的采集、处理和解释的技术方法。同时,针对工区地震地质条件复杂性及多变性的特点,因地制宜,灵活、周密地做好地震采集施工设计,是取得高质量地震资料和高勘探效益的先决条件。

由于计算机技术的飞速发展,地球物理勘探野外采集、资料处理和解释等方面的能力也在不断提高和增强。多道遥测数字地震仪发展迅速,道数一般超过千道,普遍采用了24位模数转换仪器,32位模数转换的仪器也正在研制之中。室内资料处理普遍采用并行处理和交互处理。这些都大大地推动了物探技术的发展。我们所面临的地质问题也越来越复杂,这就从客观上促使物探技术必须有较大的发展,才能适应油气勘探的需要。

随着多道地震仪及相关设备的发展,三维地震反射波法解决复杂地质问题的能力越来越被人们所认识,三维地震勘探所占物探工作量的比例在不断增加,几年前是在发现井后开始做三维地震勘探,现在已经发展为在钻探之前就要做三维地震勘探,大大加快了油气勘探的步伐。

鉴于油田开发阶段要对油气储层进行更深入细致的研究,物探技术已逐渐向油田开发延伸,三维地震、井间地震、VSP、时移(四维)地震等都可用于储层的描述和监测,并可提取井与井之间的储层连续性、不均匀性、岩性、孔隙度和渗透率等信息,结合地质、钻井、测井等多种资

料进行综合研究可进一步加深对储层的认识,提高采收率和增加产量。

在时间域处理向深度域处理转变方面,有代表性的技术是叠前深度偏移。地震勘探最终要得到的是地下深度模型,以往和目前多数计算站的做法是先在时间域进行处理,再用速度转换成深度模型。这样做的主要问题是复杂的构造和速度变化将影响时间域的成像。要解决这个问题就要在处理过程中同时解决速度模型和偏移归位的问题。目前深度偏移成像发展很快,有可能最终代替时间域的偏移成像。

采集、处理 and 解释一体化进程在加快,地震采集、处理和解释三大环节将在彼此分离 40 年之后,最终将汇集在一起。国外已有“实时三维地震成像”和“交互地震勘探”的史例。国内野外采集自 1992 年配备现场处理机以来,采集和处理的结合不断加强,在使用解释工作站后实现了叠后处理和解释的结合,目前野外数据采集、资料处理和解释一体化进程也在不断加快。随着计算机网络技术和通讯技术的飞速发展,采集、处理和解释一体化将为时不远了。

1.2 山地地球物理勘探特点

一个地区能否开展物探工作,采用何种方法和技术,主要取决于该地区的地震地质条件。山地物探工作特别是大面积碳酸盐岩出露地区的地震勘探,主要特点是地震地质条件复杂而多变,成像非常困难。

1.2.1 地表条件复杂

地表地震地质条件是指地表层地质剖面的结构和地貌特征,它决定着物探工作的采集施工条件及地震波的激发、接收条件。例如在南方古生界—中生界海相沉积盆地,经历了多次造山运动、长期风化、剥蚀,形成了现今复杂的山地地貌。通常,山地物探工作的地表条件复杂性主要表现在以下几个方面:

(1)地形险恶复杂,山高谷深坡陡,高差起伏大,相对高差约 200~1000m。悬崖断壁多,呈 V 型峡谷,两崖相对,沟深流急。山区的潜水面虽然亦随地形起伏,但地形越高,潜水面越深,常常高山缺水,影响地震施工。山区道路崎岖且稀少,地震采集施工装备运输困难。国外在类似地貌的山区施工均采用直升机吊装钻机和运输采集装备。而国内绝大部分山地物探队只能采取将仪器搬下车、钻机分解,由人抬肩扛至工地,再组装后使用,采集施工条件极其艰苦。

(2)有些地区大面积石灰岩出露。例如鄂西利川鱼皮泽地区,在大约 1000km² 的勘探面积内,石灰岩出露区占 90% 以上。通常只在岩石露头的缝隙或溶沟中有一些松土,不存在低速带。在森林茂密的较平缓地带,常遇到极其疏松的风化层,风化剥蚀严重,形成坡积物堆积,在沟谷区常见砂砾层,使地震钻井困难,激发条件差。这些砂砾层覆盖在坚硬的岩层上,且厚度变化剧烈,对地震波的激发和接收都非常不利。由于低速带变化剧烈,难以建立准确的表层结构模型,静校正值变化大,且不易求准,静校正问题十分复杂。

(3)山地表层结构复杂多变。老地层大面积出露地表,且褶皱强烈,地面地层产状变化大,构造轴部常见地层直立、甚至倒转、破碎,溶洞、裂隙发育,对有效波的衰减、吸收、波形变化影响强烈。因此,地震激发、接收条件变差造成了记录的有效波能量弱,干扰严重,信噪比低,炮间和道间的记录品质变化较大,除面波、折射波等相干噪声和随机干扰外,尤其是山丘、山包、冲沟等造成的次生干扰,使原始资料的信噪比变得很低。同时,还产生强烈的原生和次生散射波干扰,足以淹没振幅较低的反射波,局部地段可使地震记录出现空白。

(4)山地植被发育,山坡被森林及荆棘覆盖程度高,给勘探通行和施工测量造成极大困难。为了保证测量的精度,有时必须沿测线砍伐,以形成通视及工程作业通道。加之山地气候变化大,阴雨、多雾天气时间长,都给地震采集施工带来众多不便。

1.2.2 地下构造复杂

地下地质条件是指地表层以下的地质构造条件和岩石物性特征,它涉及到地震波的传播和地震成像问题。

(1)“无山不推”,说明山脉形成过程中水平运动的挤压作用。由于水平运动的原因,使一些本来是沉积盆地范围内的地区,被一些变质的老地层掩盖起来。从表面上看,沉积盆地面积小,但揭开来看,沉积盆地面积大,即逆掩断层带的老地层之下掩盖着面积大的沉积岩。所以,正是在这些被变质岩老地层覆盖的沉积盆地中,仍有许多油气田等待我们去勘探开发,这就是油气勘探潜力之所在。

(2)通常由于受多旋回构造运动的影响,地下构造复杂,褶皱强烈、断层发育、构造陡峻、地层产状变化大。构造核部逆掩推覆形成的地质结构复杂化,远远超出了物探技术常规的假设条件。这使地下成像难度加大,没有一套专门的勘探技术是很难凑效的。

1.2.3 碳酸盐岩储层预测困难

大多数碳酸盐岩地区勘探程度低、资料少、认识程度肤浅,并且各地层反射系数差别小,阻碍了勘探和认识的深入。碳酸盐岩储层一般与裂隙和礁滩、岩溶及其次生变化有关,要查明裂隙的发育程度和礁滩、岩溶的形态和分布,进行储层物性研究,就需要有高精度的物探资料和先进的综合分析研究技术。

碳酸盐岩储层一般具有多套生、储、盖组合,含油气层系多,目的层在浅中深层均有分布。但储层多以裂缝、生物礁、鲕滩、古岩溶为主,储层类型多、结构复杂、非均质性强。

目前发现的许多油田都是受小幅度构造和小断层的控制,并且埋藏都较深。这些构造幅度一般小于50m,埋深多在3500~5000m以下。要搞清这些构造就要求提高速度精度、静校正精度和高程精度。但客观条件是地表复杂和地下速度横向变化大,这就使勘探精度难以提高。

随着油气勘探的迅速发展,地震资料不仅要能满足构造研究的需要,而且要能满足储层预测和非构造油气藏勘探评价的需要。这就迫使地震资料要有较高的信噪比和分辨率,在目的层较浅时(3000m以内),勘探效果较好。而所面临的问题是目的层较深且信噪比低,这就要求在去噪和提高分辨率方面下更大的功夫,以提取更多的物探属性,为储层预测工作奠定良好的基础。

1.2.4 成本高、生产效率低

由于山地施工条件险恶,地形陡、植被发育,交通极为不便,所有装备物资几乎全靠人抬肩扛运输,还经常需要人工开路及绳索吊拉。所以,山区地震勘探通常采用异步施工的方式,即先组织专门的测量队和钻井队人员进行测量和钻炮井,然后再进行地震采集接收。这就导致劳动力密集,劳动强度大,施工周期长,效率低。目前,国内山地地震队根据工区环境和任务要求,通常每队人员数达400~500人。川鄂湘山区二维地震勘探成本几乎为平原地区的三倍,山区二维地震平均综合成本约为5000元/炮,而平原二维地震成本仅1600元/炮。

综上所述,在山地地球物理勘探中,影响物探数据质量的因素主要是与地表地貌和地下深层地质结构的复杂性、碳酸盐岩储层的特殊性等有关。因此,针对上述因素,必须选择合适的勘探装备和相应的技术方法,采用适用于复杂地表的精度高、性能稳定、轻便的先进地震仪、可控震源、钻机和其它装备。

同时,对工区的地形和地下地质情况作细致全面的调查和反复踏勘;对激发点、接收点的位置和高程要认真实测,力求准确,严把测量关;进行采集参数试验时不可只取少量的几个点段,就以点代面,而应该全面了解工区,尽可能多做一些有代表性的点段试验。

强化资料采集与处理、处理与解释工作间的相互衔接。山地物探工作的资料处理必须由解释人员提供地质模型,并进行有针对性的地质目标解释性处理,以使物探资料能更客观地反映地下构造的实际情况。

加强区域地质综合研究。综合利用地震、重磁力和电法、遥感、地质等资料,对属于同一体系的目标作为一个整体,研究造山带强烈活动对勘探目标的控制作用和影响,以便搞清区内的地质结构、构造发育特征、构造类型或样式。

1.3 山地地球物理勘探内容

山地地球物理勘探技术在已有适用技术的基础上,区别不同的地表和地下条件,采用相应的工作方法,解决不同的地质问题。90年代以来我们取得了长足的进步,为高难度山区的地球物理勘探积累了经验,储备了技术,现已初步形成了一套山地地球物理勘探的野外采集、资料处理和解释预测的方法和技术系列,主要包括以下几个方面:

(1)形成了一套复杂地区的表层结构调查、静校正计算和基准面选取方法,提高了地震校正的精度。

(2)复杂地表区和碳酸盐岩出露区的二维和三维地震勘探采集技术,包括不规则三维观测系统设计和质量控制方法等。

(3)形成了一套地震资料处理方法和技术,重点是静校正、去噪、速度分析和偏移成像的方法,以及应用叠前深度偏移解决复杂构造问题。

(4)碳酸盐岩储层预测解释方法,利用物探、井筒和地质等信息,进行综合解释,实现了处理解释一体化,探索了碳酸盐岩储层(裂隙、岩溶、礁滩等)的预测方法。

(5)利用重磁电勘探和地面地质调查,充分发挥综合物探的优势,在地震施工前作好对盆地的初步评价。

诚然,从整体上讲,我国山地地球物理勘探技术还不够成熟,仍处于一定的进展阶段。但是只要继续加强科技攻关,把科研工作与生产密切结合,紧密围绕油气勘探目标,科学组织,大力发展配套工艺技术,就一定能增强解决复杂山地地质问题的能力,终将取得明显的勘探效果。

2 山地地震勘探采集技术

山地地震勘探采集技术是山地地震勘探的基础,它的主要任务就是获取有足够信噪比的可供解释的时间域或深度域的地下构造图像。只有得到具有高信噪比、高分辨率和高保真度的野外采集记录,才能为后续资料处理和解释提供优质的资料。山地地震勘探的前提在于要有先进的采集装备和运载工具。地震波激发是山地地震勘探的主要问题之一,山区的激发方式仍以炸药震源为好;通常以单深井或多井组合为主,激发岩性以含水岩石为佳。可控震源由于受地形和交通条件的限制,难以推广应用,但在山势较缓的地区值得使用。一般一个山地队应具备多种激发手段。山地地震勘探的观测系统,通常按目的层所需频率计算道距,以避免空间假频;在地层倾角大的地区,通常采用在地层下倾方向激发,上倾方向接收的观测系统;为减少侧面干扰和次生干扰,只有在无法布置直测线时,才可采用轻度弯曲测线。为了减少地形和陡倾角地层的影响,在山地地震勘探中大都采用多道小道距大排列、垂向大组合基距、对称或不对称中间放炮的观测系统以及高覆盖次数等。

从地表地形情况看,山地测线穿越平地、黄土层、山坡、山梁、冲沟、冲积扇、河谷及戈壁滩等各种地貌,地形复杂、起伏大。通常同一条测线各观测点的高差就达 50~200m 或更大,地形最大坡度达 60°以上。表层覆盖物主要是砾石、砂粒和黄土层等。

从表层地震地质条件看,表层结构复杂,低降速带变化剧烈,难以建立准确的低降速带模型,严重影响静校正。河床砾石及山前洪积区岩性疏松,对地震波的吸收衰减严重,深层高频能量的损失尤为明显。一些工区浅层还存在高速层等屏蔽带,使地震波能量难以下传,影响深层资料的品质。通常面波、浅层折射波、散射波等主要干扰波能量强,严重影响原始记录的信噪比。

针对上述困难和问题,只有从资料采集的每个环节入手,包括地震仪器、震源、钻机等的选用,激发因素、接收方式的选择,震检组合、观测系统等的合理设计,层层把关,严格施工,才能确保采集质量,获得满意的资料。

在地震采集技术中,应该根据野外实际情况,尽可能多地修改采集参数,以适应山地的自然条件。或者说山地物探工作者应把精力用于设计精细的观测系统,提高采集资料的信噪比和保持有效频带宽度。在保证勘探目标的清晰度和分辨率的条件下,应尽量适应山地地震勘探的地形和交通条件。努力提供完整的未畸变的数据集,采集参数应选择在时间和空间域上对波场正确采样,根据所需的频率和波数确定道间距和采样率,防止出现假频。当前,山地高分辨率技术、山地三维勘探技术、山地 VSP、纵横波联合勘探都在如火如荼的发展和研究之中。

2.1 山地地震勘探装备

油气勘探的需要和先进的装备推动了山地地震勘探技术的快速发展,由于多道遥测数字仪和大型计算机的应用以及不断改进,大大推动了采集、处理和解释技术的进步,增强了解决复杂问题的能力。特别是 90 年代以来物探装备的更新,山地地震勘探中多道遥测数字采集系统、GPS 卫星定位仪、全站仪、适用于山地不同地层的轻便空气钻机等装备的应用,克服了山地恶劣地形及缺水等诸多施工困难,为实现山地地震勘探突破提供了必要的条件。

2.1.1 测量仪器

石油地球物理勘探测量是利用大地测量资料和地形图,按照一定的测量程序和精度要求,把物探设计测线放样在实地,并精确地测定测线上各物理点的坐标和高程,为绘制各种图件提供基础数据。

山区物探测量要比平原地区困难得多。山区复杂的地形地貌条件对测量的精度要求较高,因此在平原地区测量采用过的经纬仪、测绳等已被淘汰,代之以 GPS(全球定位系统)接收机、全站仪、红外测距仪进行实测。在国外,GIS(地理信息系统)和 AUTOCAD(计算机辅助设计)已得到应用。我国现已普遍实现测量数据处理微机化。但是,山地地球物理勘探测量数据的无线传输、快速计算、成图等与国外相比,仍然存在较大的差距。

2.1.2 钻机

在山地地震勘探施工中,由于交通不便及山区出露岩层变化大,故对钻机要求既能适应不同岩层的快速钻进,又要求轻便、易于搬迁。国外队伍多使用适应不同地表环境和岩性的特殊钻机、多功能山地钻机,以及大功率车装钻机等。国内山地队伍在石灰岩地区及无水地区多使用 WTRZ-305、WTRZ-307 系列钻机,有水砂、泥岩层则较多使用 QPY-30 型轻便钻机(水钻)。以人抬肩扛搬运为主,钻井时效较低。例如在湘西四望山地区灰岩出露,炮井井位均位于三叠系嘉陵江组灰岩及二叠系灰岩中,由于测线附近基本上无通行条件,完全靠测量人员砍树开出“视通道”,采用人抬肩扛把钻机搬到井位上。经统计该区钻一口 15m 的炮井,平均时间为 6~9h。

所以,在山地井炮震源的地震勘探中,地震钻机起着非常重要的作用,驰骋平原的车装钻机不灵了,特别是山高水缺的陡峭山区和崎岖丘陵只有靠人抬肩扛的轻便山地钻机才能施工。近 20 年来,我国曾先后引进了加拿大坎特拉公司的 CT 系列钻机,法国 AMG 公司的 DT-150S 钻机,日本石油凿井机制作株式会社的 JP 系列钻机等。它们在山地地震勘探钻井中发挥了较好的作用。

十几年来,我国不少厂家根据石油勘探市场需求,借鉴国外经验,也分别研制了各种型号山地钻机。如中国石油天然气集团公司地球物理勘探局装备制造总厂从 1989 年开始先后生产出了 WTZ-30、WTZ-30A、WTZ-20、WTRZ-301、WTRZ-302、WTRZ-303、WTRZ-304、WTRZ-305、WTRZ-306 型山地钻机,1999 年又开发生产了轻便 WTRZ-307 型人抬山地钻机。中国石油天然气集团公司四川石油管理局研制生产的 DY-30 型山地钻机等,90 年代初以来都成功地投入了山地地震勘探。另外还有湖南长沙探矿机械厂生产的 QPY-30 型轻便钻机,湖南衡阳探矿机械厂生产的 XJ100-1 型钻机等,都在山地地震勘探中立下了汗马功劳。国内外部分山地钻机主要技术参数见表 2-1-1。

表 2-1-1 国内外部分山地钻机主要技术参数表

钻机型号	CT-155	JP-30	DY-30	QPY-30	TD-150S	WTRZ-307
产地	加拿大 (坎特拉)	日本	中国四川 石油管理局	中国长沙 探矿机械厂	法国(AMG)	中国石油天然气集团 公司石油物探局 装备制造总厂
钻井深度(m)	30	30	30	30	40	30
井径 ϕ (mm)	90	120	90	110	90	82~89
提升力/加压力(N)	15000/15000	2500/2500	10000/10000	9800/7360	1000/4900	15000/15000