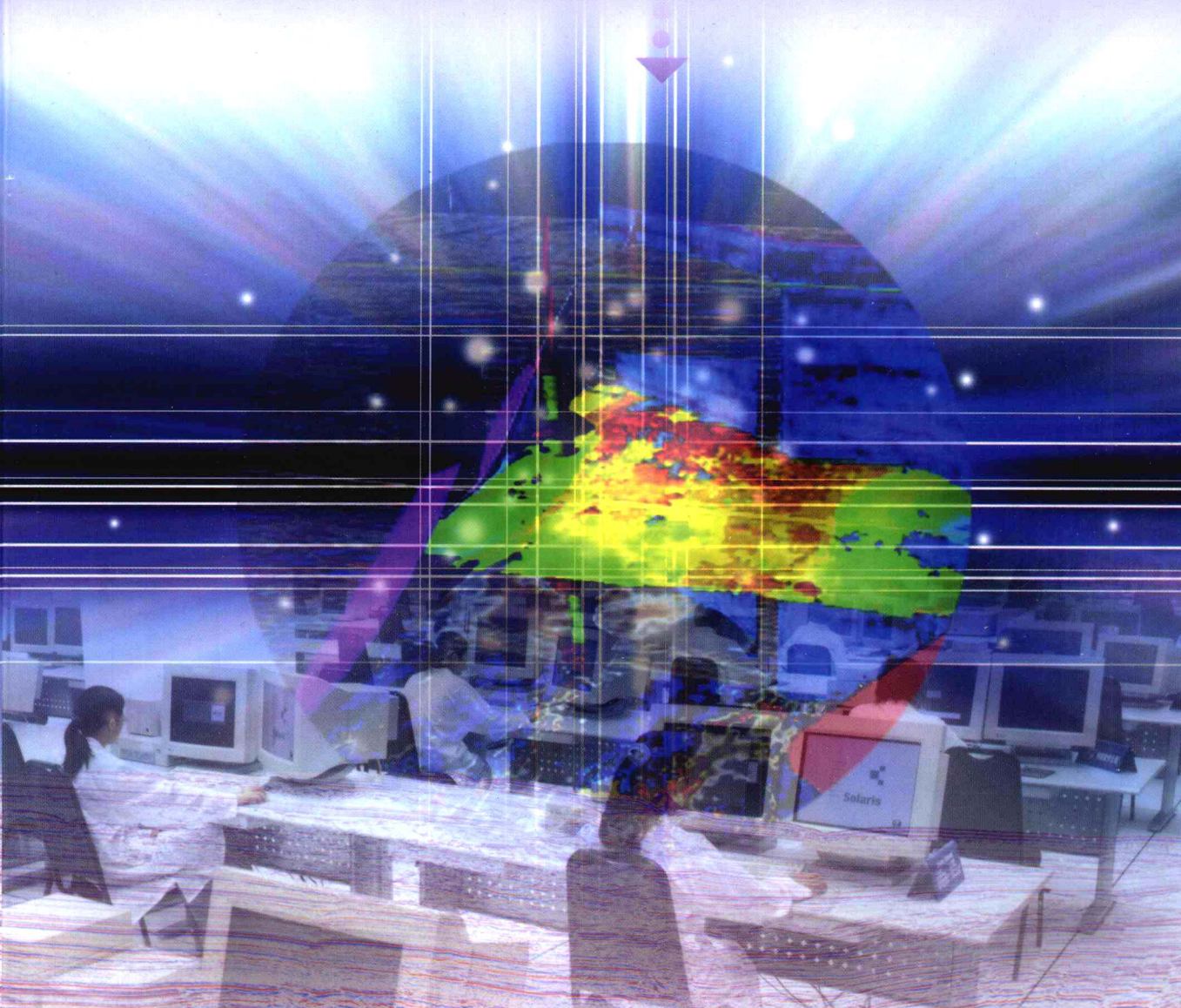


应用地震数据处理方法

王有新 编著



石油工业出版社

应用地震数据处理方法

王有新 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是关于地震勘探数据处理方法方面的专著。具体分为概述、共中心点叠加、信号分析与数学变换、地震分辨率、地震信噪比、地表一致性校正、偏移成像、多波多分量地震数据处理、地震属性和储层地震数据处理等9章。

第1章描述地震勘探的发展和现状,适合非地震处理的相关专业人员;第2章讲述常规处理的内容,适合普通专业技术人员;第3章是信号处理基础,适合程序设计人员;第4~9章分别讨论各专业方向的技术和方法,可供研究和应用方面的技术人员选择使用。

本书适合地震数据处理、方法研究和软件开发等专业人员使用,也可以供野外采集、地震解释、勘探工程与设计等方面的专家查阅。本书还可作为科研院所和高等院校的研究生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

应用地震数据处理方法/王有新编著.

北京:石油工业出版社,2009.2

ISBN 978-7-5021-6957-2

I. 应…

II. 王…

III. 地震数据-数据处理-方法

IV. P315.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第209238号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:19

字数:480千字 印数:1—2000册

定价:65.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

向山东省胜利油田地学开拓基金会致意

序

石油与天然气作为重要的战略资源对社会发展和能源安全有巨大的影响。实践表明，地震数据处理在油气勘探开发中扮演着异常重要的角色。然而，随着勘探开发的逐步深入，其油气发现与开采的难度日渐增大，这就迫切需要持续提升地震数据的信噪比、分辨率和保真度，获得高品质的资料，以帮助破解越来越复杂的勘探开发难题。

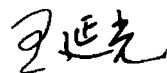
地震数据处理是一个很庞大的系统工程。数十年来，不论其理论与方法，还是技术与应用，均取得很大进步并且快速发展。对于从业者而言，既要掌握老知识，又要探索新方法，同时要求技术人员具备非常丰富的实践经验和非常扎实的数理基础、地质与油藏知识，二者不可偏颇，必须有机地结合，否则不会获得满意的结果。

当前，一方面地震处理技术的应用有一种工匠化的倾向，部分技术人员过分依赖软件或过度使用软件，单纯追求剖面效果，忽略方法的适用性和参数的合理性，这种习惯和做法是危险的、不可取的。另一方面，地震处理方法与技术的阐述相对单一，缺乏研究历程、系统性和关联性，从而导致研究人员难以形成系统思维和创新思想，只沉湎于某个具体环节和算法的演算与推导，忽视掌握基础知识的深度和宽度，以及运用知识的能力。

《应用地震数据处理方法》系统全面地论述了地震数据处理的基本方法及其发展和演绎的过程。该书很好地体现了理论与应用、整体与分类、经典与辅助的关系，内容涵盖了地震处理领域的主要技术和方法。我认为有三个突出的特点：一是定义明确，准确地表述了方法的概念和作用；二是论证充分，详细地讨论了方法的原理、算法和参数关系；三是叙述完整，全面地描述了方法的概况和发展。

王有新先生自 1982 年毕业以来，一直从事地震数据处理的方法研究与技术应用工作，在该方面具有很深的造诣，并于 1997 年获得国务院政府津贴。《应用地震数据处理方法》正是他 20 多年潜心研究、刻苦钻研、勤奋笔耕的成果结晶。书中不仅包括经典算法和公式，而且对相关方法及其关系做了详细说明，对基本问题进行了充分的论述，更难能可贵的是还包含了作者的深刻理解与认识和专业技术经验。相信该书的出版，对地震处理方法的研究和应用有很好的参考价值，并将推动地震数据处理技术进步，为油气资源发展战略做出积极贡献。

胜利油田物探研究院



2009 年 2 月

致 谢

谨以此书感谢我的父母及家人；感谢我的导师杜世通教授、李庆忠院士、张关泉教授和在油气勘探事业中辛勤劳动的科技工作者。

值此机会，笔者感谢俞寿朋、周兴元、杨云岭、汪廷璋、董敏煜、李承楚、牟永光、**陈祖传**等专家和学者；感谢管忠、杨昌江、韩文功、王延光、方栋良、张海臣、李光文、徐观学、余大祥等领导同事；特别感谢我的夫人和儿子。

笔者感谢国内外相关专家、学者、教授和他（她）们出色的研究成果，以及相关参考文献、期刊、协会、会议、网站和出版社；书中虔诚地引用了其中的公式、方法、概念和思想并加以叙述和讨论，对于其中不恰当、不充分、不合理和不准确的地方，敬请指正且心怀感激。同时，诚挚地希望读者对本书内容的正确性、系统性、完整性、条理性和其他方面提出宝贵意见，以便以适当方式予以改正。联系方式：

uxinwang@sina.com; uxinwang@sohu.com; uxin.wang@gmail.com; uxin@slof.com。

面对浩瀚如海、精彩纷呈的专业资料与有限的时间精力，每个专业人员经常需要做出选择：既要掌握老知识，又要探索新方法。对此，希望本书能起到铺垫、旁证和引导的作用。

杜启振、张行民、王振华、倪逸、郭树祥、陈继中、孟宪军、王成礼、李振春、付瑾平、单联瑜、王兴谋、郭建乐、张有芳、尚应军等专家对本书内容提出了宝贵意见，特别是杜启振教授指出了其中多处错误，张行民教授提出了具体修改意见，在此一并致谢。

胜利油田深厚的文化底蕴和宽松的科研氛围使笔者受益匪浅，在此感谢胜利油田物探研究院、组织部和博士后科研工作站。

本书由山东省胜利油田地学开拓基金会和胜利油田物探研究院资助出版。

目 录

1 概述	(1)
1.1 地震勘探技术发展	(2)
1.2 井中地震技术	(7)
1.3 地震波基础	(9)
1.4 地震勘探基础	(13)
1.5 地震处理技术	(18)
参考文献	(24)
2 共中心点叠加	(26)
2.1 预处理	(26)
2.2 静校正	(28)
2.3 正常时差校正	(33)
2.4 倾角时差校正	(36)
2.5 共反射面叠加	(44)
2.6 叠加速度分析	(48)
2.7 共中心点叠加	(50)
2.8 辅助技术	(53)
参考文献	(56)
3 信号分析与数学变换	(59)
3.1 信号分析与运算	(59)
3.2 Fourier 变换	(63)
3.3 二维 Fourier 变换	(71)
3.4 希尔伯特变换	(73)
3.5 小波变换	(75)
3.6 Radon 变换	(81)
3.7 K-L 变换	(85)
3.8 其他变换	(87)
3.9 传输函数	(91)
参考文献	(94)
4 地震分辨率	(95)
4.1 基本问题	(95)
4.2 反算子与维纳方程	(98)
4.3 尖脉冲和预测反褶积	(101)
4.4 整形滤波与子波处理	(103)
4.5 最大熵反褶积	(106)
4.6 最小熵反褶积	(110)

4.7	谱白化和谱均衡	(113)
4.8	反Q滤波	(115)
4.9	其他反褶积方法	(118)
4.10	盲系统问题	(120)
	参考文献	(125)
5	地震信噪比	(127)
5.1	噪声与提高信噪比	(127)
5.2	频率滤波器	(129)
5.3	二维滤波	(133)
5.4	$f-x$ 域空间滤波	(137)
5.5	压制相干噪声	(138)
5.6	压制多次波	(140)
5.7	信号增强	(146)
5.8	其他方法	(148)
	参考文献	(150)
6	地表一致性校正	(151)
6.1	地表一致性	(151)
6.2	折射波静校正	(153)
6.3	最小平方剩余静校正	(160)
6.4	最大能量法剩余静校正	(163)
6.5	地表一致性反褶积	(165)
6.6	其他地表一致性方法	(167)
	参考文献	(169)
7	地震偏移成像	(173)
7.1	偏移原理	(173)
7.2	有限差分法	(180)
7.3	时间—空间域偏移	(183)
7.4	频率—空间域偏移	(186)
7.5	频率—波数域偏移	(188)
7.6	双域波场延拓	(191)
7.7	三维偏移	(193)
7.8	分裂法	(196)
7.9	串联偏移	(199)
7.10	逆时偏移	(201)
7.11	显式算子	(203)
7.12	射线追踪方法	(205)
7.13	积分法偏移	(210)
7.14	$\tau-p$ 域偏移	(214)
7.15	高斯束偏移	(217)
7.16	共焦点偏移	(220)

7.17	平面波和面炮偏移	(221)
7.18	叠前偏移	(223)
7.19	真振幅偏移	(227)
7.20	叠前时间偏移	(231)
7.21	复杂地表问题	(235)
7.22	偏移速度分析	(238)
	参考文献	(243)
8	多波多分量地震数据处理	(250)
8.1	岩性勘探	(250)
8.2	多分量地震	(254)
8.3	纵波和横波处理	(259)
8.4	转换波处理	(263)
8.5	矢量处理技术	(269)
	参考文献	(274)
9	地震属性和储层地震数据处理	(276)
9.1	地震属性	(276)
9.2	AVO与AVA分析	(278)
9.3	地震反演	(280)
9.4	储层地震数据处理技术	(285)
9.5	四维地震数据处理技术	(288)
	参考文献	(290)

1 概 述

地球物理勘探是通过物理测量的方法认识地下地层的物性及结构的科学实验过程，它包括三个方面：首先接收或测量探测区域的地球物理场，然后通过数值方法计算和恢复探测对象的特征参数和分布，再在分析和解释的基础上认识和推断探测目标的某种特性和属性。

地球物理场包括天然产生或人工激发的磁场、电场、地球重力场、地震波场等。在天然存在的地球物理场中，探测对象（矿体或地质构造）本身就是一个场源。例如，磁铁矿及含铁磁性物质的岩体产生的局部磁场；铬铁矿和盐丘等密度不同于围岩的矿体或岩体产生的附加重力场。这些附加场叠加在正常场之上，形成可以探测到的异常场。天然地震的波场也属于天然地球物理场。人工地球物理场是通过外部因素激发产生的，如爆炸产生的弹性波场，由于介质密度和弹性常数的变化造成波阻抗的变化，或者由于地层内不连续面的存在，弹性波在传播过程中发生反射、折射、衰减等现象，同时携带着关于介质的分布和属性等信息。向地下输入电流或发射电磁波，也属于人工激发地球物理场。

1640年，瑞典人曾利用磁罗盘来寻找磁铁矿，被认为是历史上物探方法的开端；1922年，在墨西哥湾根据重力勘探原理首次探测到与盐丘构造有关的油藏；1919年，在墨西哥湾使用地震折射波法成功地寻找到盐丘含油构造；1927年，在美国俄克拉何马州使用地震反射波法发现了多个油田。重力勘探、磁法勘探、电法勘探、地震勘探和地球物理测井已成为石油物探的常规方法并得到持续发展。

(1) 重力勘探：地下岩层密度的差异会引起天然重力场和重力加速度的相对变化。重力勘探是利用在地表附近测量的重力加速度来寻找矿体和地质构造，并确定它们的形态、大小、空间位置及其分布情况的应用地球物理方法。

(2) 磁法勘探：地下岩石和矿石的磁性差异引起天然地磁场的局部变化。磁法勘探是根据磁场异常来研究寻找磁性矿体和地质构造的方法。它可以用于探测基底表面起伏和基底内部结构，划分区域构造单元，计算磁性体埋藏深度和沉积岩层的厚度，也可能反映沉积岩中的火成岩侵入或喷发的情况。

(3) 电法勘探：根据地下介质的电阻率等电学性质及电化学性质的差异，分析基底表面起伏，划分区域构造单元；在条件有利的地区还可以估计沉积岩层构造和寻找油气。

(4) 地震勘探：根据地下地层波阻抗的差异，测量人工激发的地层反射波和其他地震波，分析地质构造和断层分布，寻找与背斜、断层、断块和盐丘构造等有关的构造圈闭油气藏；研究地层的岩性和岩相变化，寻找与地层遮挡、岩性尖灭、礁块和古潜山等有关的岩性圈闭油气藏。地震勘探方法主要分为反射法和折射法两大类，在油气勘探中得到广泛应用。

(5) 地球物理测井：按所探测的岩石物理性质或探测目的可分为电法测井、声波测井、放射性测井、地层倾角测井、气测井、地层测试测井、钻气测井等。

地震勘探技术经历了持续发展和不断进步的过程，从单一地震（地面—地面）到多地震（地面—地面、地面—井孔、井孔—井孔）；从单分量到多分量（海底4C、井孔三分量、陆地数字传感器）；从一次野外采集到多次时间推移；从早期初级的勘探一体细分为采集、处理、解释三个专业方向。在这个过程中，国内外技术水平的差距正在缩小，在许多应用领

域,国内某些应用技术处于领先地位,但是在地震方法研究和技术发展方面,曾经一度缩小的差距似乎又在加大。本章试图通过分析地震勘探技术及其发展状况,加深对于这个问题的认识。主要内容包括地震勘探技术发展、地震处理技术概况、地震波基础和勘探地震学原理。

1.1 地震勘探技术发展

地震勘探是自然科学和人文科学的综合发展成果,在横向上与其他学科有千丝万缕的联系,在纵向上得益于人类社会的需求和自身的进步。本节简略回顾地震勘探的发展历程,引用资料主要来自 SEG 第 50 届与 SEG 第 75 届年会论文、地球物理服务公司及院校研究单位和东方地球物理勘探有限责任公司汪廷璋教授提供的材料。文中图片主要是示意性质,在选择和说明上有所侧重。

1.1.1 地震勘探

地震勘探是通过研究地震波在地层内的传播规律来确定介质岩性和地质构造的应用地球物理方法,主要包括地震数据的采集、处理和解释三个方面的内容。

(1) 地震数据采集:根据一定的观测设计和激发接收方式测量和收集地震波资料。勘探资料包括野外观测布置、地表高程和水底深度、近地表介质的速度和厚度分布、地震记录及其携带的地下地层信息。因此,野外采集是一个从地层介质到地震数据的物理正演过程。

(2) 地震数据处理:根据物理规律和数学方法对勘探资料进行整理、加工和计算并恢复地层介质分布信息。主要包括:解编和预处理、反褶积、消除噪声、静校正、共中心点叠加和偏移成像等处理过程。因此,室内处理是一个从地震资料到地层信息的数值反演过程。

(3) 地震数据解释:根据地震剖面和综合资料推断地质构造与地层岩性。包括地层解释、构造解释、断层解释、地质解释、切片分析、岩性分析、层序分析、沉积相和盆地分析、构造图和油气圈闭等。

1.1.2 发展历史

公元前后,伟大的思想家们拉开了认识客观世界的序幕,这里列举的有塞勒斯数学原理、欧几里得几何、阿基米得原理、苏格拉底的人文哲学、柏拉图的精神世界和亚里士多德的认知体系,以及东汉张衡创制的世界上第一架测试地震的候风地动仪(图 1.1)。他们的科学思想开创了认识世界和描述世界的道路。

基本原理的发现需要经历上千年的探索,15—17 世纪科学家的卓越研究奠定了地震学的基础。Snell 折射定律、Fermat 最小时间原则、Huygens 二次波前定律、关于应力应变的 Hooke 定律和 Newton 运动定律等伟大发现一直闪耀着科学的光辉。

现代油气勘探的理论基础形成于 19 世纪。1828 年,Poisson 研究了关于 P 波和 S 波的运动方程。其他早期从事弹性介质波动问题研究的学者有 Stokes, Kirchhoff, Cauchy, Green, Reileigh, Knott, Zoeppritz, Kelvin, Lamé, Love, Stoneley 等,其中许多类型的弹性波以他们的名字命名。

地震勘探开始的标志是马莱(Mallet)1845 首次实施的人工野外观测(图 1.2)。他在地下引爆炮弹,然后通过望远镜观察放在远处容器中水银表面的波动,用一只跑表记录爆炸传到水银表面的波动所经过的时间。从这些观察中,他推断出地震波在不同介质中具有不同的传播速度,首次清楚地理解了地震波受传播介质物理性质的影响。

1876 年,Abbot 领导的工程队在美国纽约测量了炸药震源地震波的速度;1885 年,

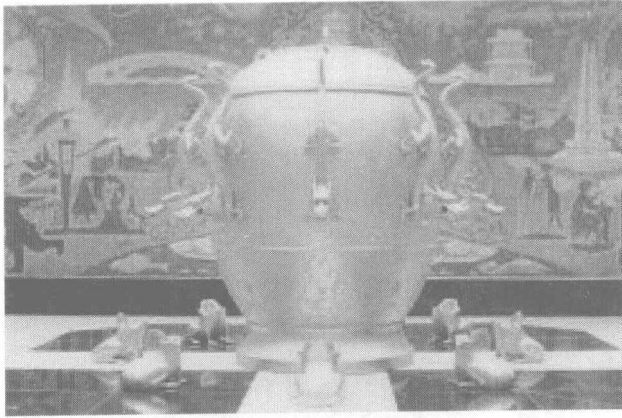


图 1.1 世界上第一架地震仪

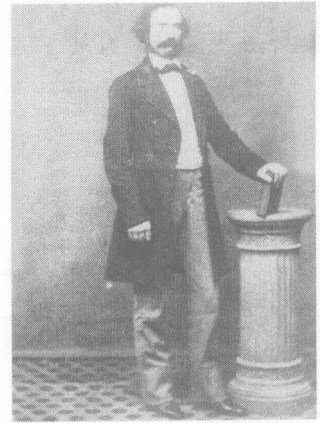


图 1.2 Mallet, 1845 年首次人工地震观测

Milne 和 Gray 用两个机械地震仪记录了重物下落的震动能量。1897 年, Oldham 通过分析 and 识别 P 波和 S 波来确定震源位置。在民用工程方面, 地震波探测应用于表层岩石结构, 从而保证大坝和巷道的安全。在军事方面, 利用声纳探测军舰和飞机等。

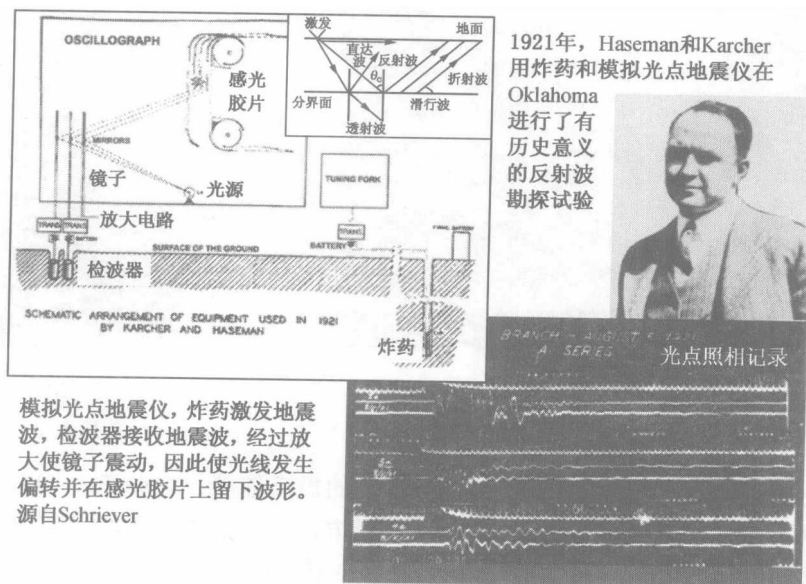
1919 年德国人明特罗普 (L. Mintrop) 申请到折射法的专利。从 1924 年开始的几年内, 利用折射法在墨西哥湾沿岸地区发现盐丘储油构造。20 世纪 30 年代末, 苏联 Г. А. 甘布尔采夫等吸收了反射法的记录技术并对折射法作了相应的改进, 提出折射波对比法。早期折射波法主要在初至区内进行观测, 称为折射波初至法; 改进的折射法在反射波的续至区内观测折射波, 称为折射波对比法, 能更细致地研究对比波形特征; 折射波法受到精度和排列的限制, 更多用于浅层探测, 解决工程、环境、水文地质等勘查问题。图 1.3 是折射波地震勘探的说明性图片。



图 1.3 折射波法地震勘探

反射法地震勘探最早起源于 1913 年费森登 (R. Fessenden) 的工作, 他发明了早期的声纳装置并申请了专利。1921 年, 美国人卡切尔 (J. C. Karcher) 把反射法投入实际应用,

在俄克拉何马州首次记录到人工地震产生的清晰的反射波（图 1.4）。1930 年，根据反射波法地震勘探的结果发现了油田，从此反射波法进入了工业应用阶段。



模拟光点地震仪，炸药激发地震波，检波器接收地震波，经过放大使镜子震动，因此使光线发生偏转并在感光胶片上留下波形。
源自Schriever

图 1.4 早期反射波勘探（光点记录）

20 世纪 30 年代相继建立了许多地球物理服务公司，有的变成了今天著名的石油企业。1930 年，美国勘探地球物理学家学会（SEG）成立。该阶段接收系统从 1 个卡车的单道发展为 12 道，每道超过 6 个组合检波器，使用模拟光点记录地震仪，组合技术、计算静校正和确定速度等是初期地震处理技术的杰出成果。

20 世纪 40 年代发展到 24 个记录道 12 个检波器组合，模拟光点地震仪包含前置功放和滤波，由电子管和变压器组成，振动模拟波形被记录到感光照相纸上。地震处理和解释是由人脑、手工、计算尺和各种标尺实现的。

20 世纪 50 年代的一个重要进展是模拟磁带代替光点照相（图 1.5），从而可以实现不同因素的多次回放，主要特征是晶体管和磁带。另一个重大发展是多次覆盖共中心点叠加技术，利用磁带的回放和逻辑电路进行半自动处理，例如多次覆盖叠加和计算速度谱等，信号在每次回放过程中受到衰减。1951 年 3 月，翁文波组建国内第一个地震队，采用美制 24 道光点地震仪（图 1.6），标志着中国石油地震勘探的开始。该时期国内多数地震队主要使用从苏联进口的多种型号地震仪。1956 年，西安仪器厂试制出中国第一台 DZ-5 系列电子管地震仪，50 年代中国地震勘探技术落后于国外领先水平约 25 年。1955 年发现克拉玛依油田；1957 年建成玉门油田石油基地；1958 年发现青海油田；1959 年发现大庆油田。

20 世纪 60 年代数字记录逐渐取代模拟记录，数字地震仪采用模数转换和时序记录 SE-GA 标准，利用集成电路实现二进制增益放大。电子计算机开始用于数据处理，代表室内地震处理技术的真正开始，其中包括信号分析、振幅恢复、滤波、反褶积、静校正和动校正等。1964 年在胜利油田自行研制出 DZ 系列模拟磁带地震仪，1965 年从法国引进模拟磁带地震仪，陆续装配地震队并推广多次覆盖技术。1968 年在胜利油田地质指挥所安装了山东省第一台国产晶体管电子数字计算机 DJS-21。20 世纪 60 年代中国地震勘探技术落后于国外领先水平约 20 年。1962 年发现胜利油田；1964 年发现大港油田；1965 年开始海上勘探

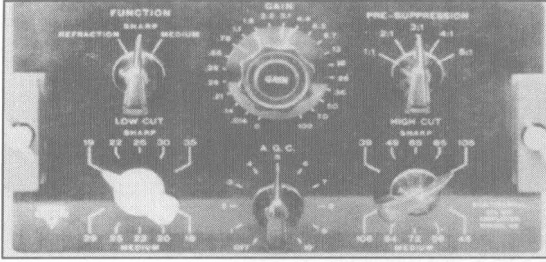


图 1.5 模拟地震仪控制面板，上面有滤波器的低频和高频按钮及 AGC 按钮（源自 Conoco）

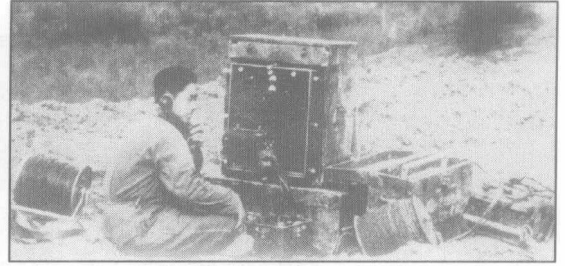


图 1.6 中国引进的第一台轻便地震仪，图中年轻的观测员是高大容

并取得“51 型”地震剖面；1969 年发现辽河油田。

20 世纪 70 年代数字地震仪采用瞬时浮点放大器，遥测数字地震仪则进一步在采集站直接数字化，由模拟信号传输转变为数字信号传输。三维勘探开始试验，主要目标是构造勘探。以大规模集成电路为特征的电子计算机开始大量用于地震数据的日常处理，地震偏移算法得到发展和应用。中国 1973 年引进法国 SN-338 数字地震仪，1978 年批量生产 SDZ 系列瞬时浮点地震仪并迅速装备地震队；1973 年成立石油地球物理勘探局计算中心站，采用国产 DJS-11（150 机，百万次）和国产软件；1978 年成立石油地球物理勘探局研究院，采用 CYBER-1724 计算机和 CGG 软件。该时期中国地震勘探技术落后于国外领先水平约 15 年。20 世纪 70 年代相继发现长庆油田、河南油田、华北油田和中原油田等。

20 世纪 80 年代全面进入数字化三维勘探和高分辨率勘探阶段，野外采集和室内处理的能力呈现爆炸式增长，交互界面开始进入地震处理。中国地震队全面实现数字化地震仪，相继建立大型地震数据处理中心，以超大规模集成电路为代表的超级计算机和微型计算机进入地震处理领域，相应软件的开发和应用不断发展。1983 年石油地球物理勘探研究院配置 IBM 大型计算机和西方地球物理公司软件；1986 年，胜利油田成立计算中心。该时期中国地震勘探技术落后于国外领先水平约 10 年。1988 年发现塔里木轮南油气田；1989 年发现吐哈油田。

20 世纪 90 年代采用新型全数字 24 位遥测地震仪，勘探技术发展到了岩性勘探、山地勘探、多波勘探、3D VSP、井间地震、随钻地震、海底电缆、4D 地震、储层预测等。叠前深度偏移技术应用于盐下和复杂构造成像并发现许多盐下高产油气田。大规模并行计算机和微机集群及并行处理技术软件得到广泛应用和快速发展，交互处理和图形窗口得到大量使用。中国发布处理软件 Grisys。该时期中国地震勘探技术落后于国外领先水平约 5 年。

2000 年的标志是基于微电子机械系统（MEMS）的新型多分量数字传感器，基本配置三分量的接收能力是 10000 道 3333 观测点，扩展配置达到 30000 道 10000 观测点。三分量地震勘探采用数字传感器，具有动态范围大、超低噪声、多记录道、多分量保真度、全方位信息、小面元网格和高覆盖次数的特点，以及耗电量低、设备轻便、感应器倾斜校正等优良特性。能自适应地消除噪声和串音，不受外界电磁信号干扰，有效降低野外采集成本，这必将引起地震技术的再次发展和进步。国内某些勘探应用技术同步发展或领先进步，先导技术与核心技术的研究和水平尚有不及。

从最早的人工测试地震波到现在已经过去 150 年，石油勘探经历了不平凡的发展过程。在这个过程中，地震技术从简单到复杂，从低级到高级，震源、检波器、记录、排列、地震仪和野外工作方式也经历了持续发展和不断进步的过程（见图 1.7 至图 1.10）。



图 1.7 震源的变化和发展



图 1.8 检波器的变化和发展



图 1.9 记录方式的变化和发展

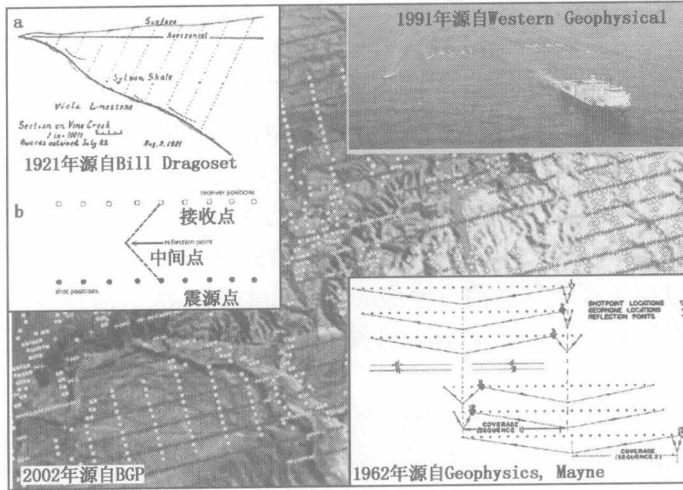


图 1.10 野外观测的变化和发展

1.2 井中地震技术

根据激发和接收的相对位置关系，地震勘探分为地面—地面、地面—井孔和井孔—井孔，分别对应地面地震、垂直地震和井间地震；根据接收的弹性波场，地震勘探可以分为反射纵波和多分量转换波；根据地震数据的采集时间，地震勘探扩展到地面（海底）地震多分量时间推移、垂直地震多分量时间推移和井间地震多分量时间推移，它们在现代地震勘探技术的基础上统一起来。

通过对现成地震处理技术的适当应用和简单扩展，可以对每个地震每个分量的数据进行处理，通过借鉴不同地震数据的信息，可以改善处理效果。显然，具有时间推移的多地震多分量联合的数据处理方式将会对处理技术本身产生直接的帮助，所以，一个多地震一体化的多分量数据处理的时代正在到来。

1.2.1 VSP 技术

VSP（垂直地震剖面）是按照一定的观测系统在地面激发并在井孔垂向排列的检波器上接收的记录。观测系统表示震源和接收点之间的相对位置关系，根据地面震源点的分布，可以分为零偏移距 VSP、非零偏移距 VSP 和三维 VSP 等（图 1.11）。

VSP 记录具有如下特点：（1）接收直接穿过目标岩体的地震透射波与反射波，可以避开地表低降速层带，具有较高的分辨率和信噪比；（2）与

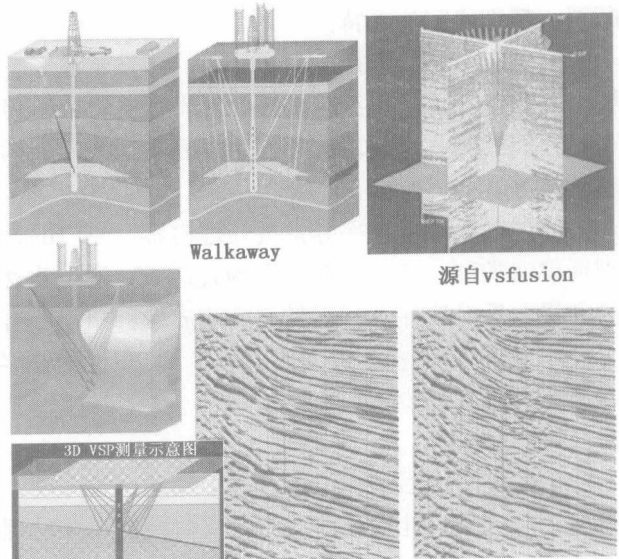


图 1.11 各种 VSP 技术与记录

介质的耦合程度高，地震波的动力学特征明显；(3) 接收上行波和下行波；(4) 波场呈垂向分布；(5) 采集在勘探目标的介质内进行，可以准确分辨和识别目的层的细小变化。

VSP 处理主要包括波场分离、偏移成像和地层吸收估计等，多分量处理还包括旋转定位和裂缝检测等。VSP 与地面地震有相同的震源类型，所以其分辨率尺度与地面地震相当，通过对比可以指导地面地震数据的处理，识别多次波，提供子波、反褶积算子、速度和衰减等物理参数；利用 VSP 资料可以确定地面反射波的层位对应关系，识别细微地质现象，进行层位标定和薄层研究等；VSP 与测井资料紧密结合能进一步加强探测裂缝的能力。

VSP 技术还可以用于预测钻头前方地层的岩性和监视二次采油过程。多测线、多分量、多方位、多偏移距的 VSP 观测将在勘探与开发、处理与解释的结合上发挥更大的作用。

1.2.2 井间地震

井间地震是在一口井的目标深度上设置密集震源点，在另外一口或几口井中分段布置密集检波器，按照一定排列和观测系统进行激发和接收而得到的地震记录（图 1.12）。

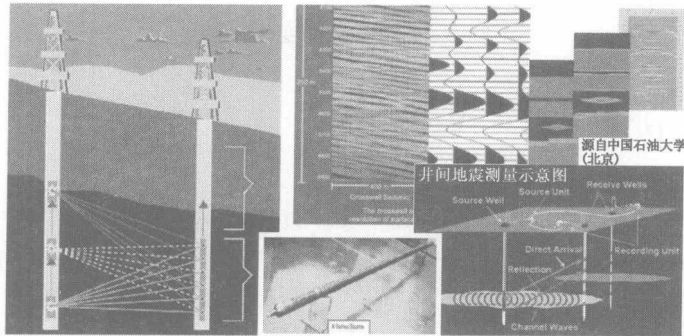


图 1.12 井间地震技术

井间地震在油藏开发阶段用于分析储层参数变化和估计流体参数分布以及开发工程中的动态监测，在勘探距离和分辨率方面介于地面地震和测井之间，能够准确圈定河道砂体和微小断层，精细研究油藏特征等。

井间地震记录的特点表现在：(1) 激发子波频率高，可以达到几千赫兹以上；(2) 记录采样间隔小，保证地震波有足够的频带宽度；(3) 传播过程的频率成分损耗低，没有经过低降速带介质的吸收；(4) 波场复杂，有直达波、转换波、上行和下行反射波、导波、多次波和套管波等。

井间地震处理包含部分常规处理内容，专门的处理技术包括：(1) 根据道集选排分析和识别地震波类型；(2) 解释和识别直达波，通过直达波旅行时反演建立井间速度模型；(3) 分离和提取反射波并进行反射波叠前成像；(4) 层析成像。

井间地震有 30 多年的发展历程，到 20 世纪 90 年代末，数据采集、处理、成像和解释技术不断进步，逐步达到实用化。

1.2.3 随钻地震

随钻地震的作用是在钻进过程中确定钻头深度、生成钻头前方延伸地层的图像、预测钻头附近和前方的岩性和孔隙压力，实时控制钻井过程并降低风险。

随钻地震是利用钻进过程中钻头与钻遇地层之间的撞击和摩擦所产生的振动作为震源，检波器布置在地面用以接收钻头振动能量，固定在钻杆顶端的传感器接收钻头参考信号，用