

勘探地震学教程

朱广生 陈传仁 桂志先 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

勘探地震学教程

朱广生 陈传仁 桂志先 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

勘探地震学教程/朱广生,陈传仁,桂志先编. —武汉:武汉大学出版社,2005.12

ISBN 7-307-04793-4

I. 勘… I. ①朱… ②陈… ③桂… II. 地震勘探—高等学校—教材 N. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 098242 号

责任编辑:史新奎 责任校对:刘欣 版式设计:支笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:荆州市天园印刷公司

开本:787×1092 1/16 印张:29.375 字数:709千字

版次:2005年12月第1版 2005年12月第1次印刷

ISBN 7-307-04793-1/P·105 定价:38.00元

版权所有,不得翻印:凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

本书是根据石油地球物理勘探专业的“地震勘探原理”和“地震波动理论”教学大纲要求,结合编者长期教学经验和科研成果编写的。

全书除绪论外共分8章。前7章主要内容包括:地震波的理论,几何地震学,地震数据采集,地震速度,地震资料解释;最后一章写了垂直地震剖面法,多波多分量地震方法,时延地震法,微震监测方法。这几种地震方法分别有自己的理论体系和专门的数据采集、处理及解释方法,但作为一门课程的教材不可能将它们作全面详细的论述,因此,本书只对这几种专门的地震方法作了概述,以期读者对这几种专门方法有最基本的了解。

本书由朱广生教授、陈传仁副教授(博士)、桂志先副教授(博士)、谢锐杰副教授(博士)编写,主编为朱广生教授和陈传仁副教授。朱广生教授写了绪论及第3、4、5、6、7章(其中7.7节除外),第8章的8.4节;陈传仁副教授写了第1章;桂志先副教授写了第2章、第8章(其中8.4节除外);谢锐杰副教授写了第7章的第7.7节。李谋杰老师为本书制作了大部分插图。

全书授课时间约需120学时,其中第1章约需50学时,其余各章约需70学时。为教学安排方便,可分别开设“地震波动理论”和“地震勘探原理”两门课,分别讲授第1章和其余各章;也可作为一门课依次讲授第1章至第8章。本书也可供石油地质专业(或相近专业)使用,但给石油地质专业学生讲授时不必讲授第1章(地震波动理论),对第4、5、6章也只需选讲部分内容,约需50学时。

书中引用了大量中外文献资料,我们对这些文献的作者表示敬意和感谢。特别对“石油地球物理勘探”和“石油物探”杂志的支持表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中的缺点甚至错误恐所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2004年10月于荆州

目 录

绪论	1
第 1 章 地震勘探弹性波理论基础	16
1.1 地球介质模型	16
1.1.1 理想弹性介质和粘弹性介质	16
1.1.2 物体的均匀性和各向同性	17
1.1.3 层状介质和连续介质	17
1.1.4 单相介质和双相介质	18
1.2 弹性理论基础	18
1.2.1 弹性理论的基本假设	18
1.2.2 弹性力学中的几个基本概念	19
1.2.3 应力分析	19
1.2.4 应变分析	25
1.3 应力与应变的关系	31
1.3.1 广义胡克定律	31
1.3.2 均匀各向同性完全弹性介质中应力与应变的关系	32
1.3.3 均匀各向同性完全弹性介质中胡克定律的表达式	35
1.3.4 各向异性介质中胡克定律的表达式	35
1.4 均匀各向同性无限弹性介质中的弹性波	35
1.4.1 弹性力学的基本方程	36
1.4.2 均匀各向同性弹性介质中的波动方程	37
1.4.3 波动方程的解	40
1.5 平面波在两种介质分界面上的反射和透射	49
1.5.1 平面波在自由表面上的反射	49
1.5.2 平面波在介质分界面上的反射和透射	55
1.5.3 层状介质中的波	59
1.6 面波	68
1.6.1 瑞雷面波	68
1.6.2 拉夫面波	71
1.6.3 斯通利波	73
1.7 粘弹性介质中的地震波	74
1.7.1 梅耶尔-福克体	74
1.7.2 马克斯威尔体	76

1.8 不均匀介质中传播的地震波	77
1.8.1 不均匀介质运动平衡微分方程式	78
1.8.2 不均匀介质中波场的耦合	79
1.8.3 一维问题的解析解	80
1.8.4 横向均匀介质中的波	81
1.9 地震波的频谱特征	83
1.9.1 各种地震波的频谱特征	83
1.9.2 各种野外地震仪记录频率范围的选择	85
第2章 几何地震学	86
2.1 地震波的传播	86
2.1.1 地震波传播的基本原理	86
2.1.2 地震波的描述	88
2.1.3 地震波的反射、透射和折射	92
2.1.4 地震波的干涉、极化、绕射和衰减	94
2.2 一个分界面情况下反射波的时距曲线	96
2.2.1 时距曲线的概念	96
2.2.2 水平界面的共炮点反射波时距曲线方程	98
2.2.3 倾斜界面的共炮点反射波时距曲线方程	99
2.2.4 共炮点反射波时距曲线的特点	101
2.2.5 正常时差	101
2.2.6 倾角时差	102
2.2.7 时距曲面和时间场的概念	106
2.3 多层介质情况下的反射波时距曲线	107
2.3.1 三层水平层状介质的反射波时距曲线	108
2.3.2 三层水平层状介质的简化	109
2.3.3 两种情况下的反射波时距曲线的比较	110
2.4 连续介质中地震波的运动学	114
2.4.1 地震波在连续介质中传播时的射线和等时线方程	114
2.4.2 速度规律为 $v(z) = v_0(1 + \beta z)$ 时, 射线和等时线的具体形式	116
2.4.3 覆盖层为连续介质时的反射波时距曲线	119
2.5 地震折射波运动学	122
2.5.1 折射波的传播规律	122
2.5.2 一个水平界面情况下折射波的时距曲线	124
2.5.3 水平层状介质的折射波时距曲线	125
2.5.4 倾斜界面的折射波时距曲线	127
2.6 多次反射波	129
2.6.1 多次反射波的分类	130
2.6.2 全程多次反射波时距曲线	131

第3章 地震数据采集	135
3.1 地震勘探分辨率	135
3.1.1 垂向分辨率	135
3.1.2 菲涅尔带	137
3.1.3 横向分辨率	138
3.2 地震勘探线布置	140
3.3 反射波法观测系统	141
3.3.1 观测系统图示	142
3.3.2 几种常见的二维观测系统	143
3.3.3 三维观测系统	146
3.4 地震波的激发	156
3.4.1 对激发的要求	156
3.4.2 炸药震源和激发条件的选择	156
3.4.3 非炸药震源	163
3.5 地震波的接收	167
3.5.1 排列长度的选择	167
3.5.2 地震检波器的安置	171
3.5.3 对地震仪的要求	171
3.6 地震干扰波	172
3.6.1 无规则干扰波	172
3.6.2 规则干扰波	173
3.6.3 水上地震勘探特有的干扰波	182
3.6.4 干扰波的观测方法	185
3.7 表层结构调查	187
3.7.1 低速带和降速带的概念	187
3.7.2 浅层折射法	188
3.7.3 微地震测井	196
3.7.4 地质雷达法	198
3.8 海上地震勘探概述	198
3.8.1 海上拖缆法	199
3.8.2 海底电缆法(OBC)	200
3.8.3 垂直电缆法(VC)	202
第4章 地震勘探组合法	204
4.1 检波器简单线性组合	204
4.1.1 检波器简单线性组合的滤波方程	205
4.1.2 简单线性组合的方向特性	207
4.1.3 组合检波参数对方向特性的影响	209
4.1.4 组合检波的频率特性	211

4.1.5 简单线性组合检波的缺点	213
4.2 不等灵敏度组合	214
4.2.1 等腰三角形不等灵敏度组合	214
4.2.2 复合线性组合	217
4.3 面积组合	218
4.3.1 等效变换方法	218
4.3.2 矩形面积组合方向特性	220
4.3.3 星形面积组合方向特性	221
4.3.4 三角形(半菱形)面积组合	222
4.4 组合检波的统计效应	223
4.4.1 地震随机干扰的相关半径	223
4.4.2 组合检波的统计效应	224
4.4.3 关于组合检波的“平均效应”问题	225
4.5 组合检波的参数选择	225
4.5.1 干扰波调查	226
4.5.2 组合形式的选择	226
4.5.3 组合点数 n 的选择	226
4.5.4 组内距 Δx 的选择	226
4.5.5 组合检波参数选择的试验方法	227
4.6 震源组合激发	228
4.6.1 组合激发的方向特性	228
4.6.2 组合爆炸时组内距的选择	229
4.6.3 组合激发和组合检波联合使用	229
4.6.4 组合爆炸与地震分辨率	230
第5章 多次覆盖方法	231
5.1 多次覆盖的一些基本概念	231
5.1.1 共中心点叠加和共反射点叠加	231
5.1.2 共中心点道集和共反射点道集	231
5.2 多次覆盖压制多次波的原理	233
5.2.1 多次波的剩余时差	233
5.2.2 多次覆盖的特性函数	235
5.2.3 多次覆盖后地震波能量的变化	236
5.3 多次覆盖特性曲线及其性质	237
5.3.1 地震波为余弦钟形脉冲时的情况	237
5.3.2 多次波剩余能量平均值	239
5.3.3 多次覆盖滤波特性曲线	240
5.3.4 观测系统参数对滤波特性曲线的影响	241
5.3.5 脉冲波形对特性曲线的影响	243

5.4 多次覆盖的统计效应	244
5.5 多次覆盖的频率响应	245
5.5.1 多次覆盖的振幅频率特性	245
5.5.2 多次覆盖的相位频率特性	247
5.6 多次覆盖观测系统参数选择	248
5.6.1 选择观测系统形式	249
5.6.2 覆盖次数 n 的确定	249
5.6.3 确定排列长度	250
5.6.4 试验工作	252
5.6.5 施工测线长度计算	252
5.7 影响多次覆盖效果的一些因素	253
5.7.1 动校正速度选取不准确的影响	253
5.7.2 地层倾角的影响	255
5.8 宽线剖面 and 弯曲测线多次覆盖	257
5.8.1 宽线剖面法	257
5.8.2 弯曲测线多次覆盖	259
第 6 章 地震波速度	262
6.1 地震波速度的影响因素及纵横波速度关系	262
6.1.1 速度的影响因素	262
6.1.2 v_p 与 v_s 的关系	271
6.2 几种常用速度的概念	272
6.2.1 平均速度 v_a	273
6.2.2 均方根速度	274
6.2.3 等效速度	278
6.2.4 叠加速度	278
6.2.5 射线平均速度	278
6.2.6 正常时差速度	279
6.3 速度的测定和计算	281
6.3.1 由速度谱计算速度的方法	281
6.3.2 由 VSP 测井资料获取速度的方法	286
6.3.3 由声波测井获取速度资料	288
6.4 各种速度间的关系	291
6.4.1 各种概念的速度间关系	291
6.4.2 不同方法获得的速度间关系	293
第 7 章 地震勘探资料解释	300
7.1 地震剖面 and 地震切片	300
7.1.1 地震记录与地质剖面	300

7.1.2 二维地震剖面概述	302
7.1.3 三维地震垂直剖面 and 水平切片	303
7.2 地震剖面的对比解释	305
7.2.1 地震剖面解释的任务	306
7.2.2 收集和 research 前人资料	306
7.2.3 地震剖面上波的对比标志	306
7.2.4 地震剖面的对比方法	307
7.2.5 地震剖面的地质解释方法	309
7.3 几种特殊的波	316
7.3.1 断面反射波	316
7.3.2 地震绕射波	317
7.3.3 回转波	329
7.4 断层解释	334
7.4.1 地震资料上断层的识别标志	334
7.4.2 断层要素的确定	340
7.4.3 断裂系统图的绘制	345
7.5 各种地质构造的地震响应	347
7.5.1 背斜在地震剖面上的基本特征	347
7.5.2 向斜在地震剖面上的基本特征	349
7.5.3 不整合在地震剖面上的特征	350
7.5.4 礁在地震剖面上的特征	351
7.5.5 盐底辟的地震特征	354
7.5.6 地震剖面上的泥底辟	359
7.5.7 火成岩体在地震剖面上的特征	363
7.6 地震构造图	368
7.6.1 构造图的概念	368
7.6.2 反射界面空间校正原理	371
7.6.3 地震构造图的编制方法	378
7.7 地震地层学简介	393
7.7.1 发展概况	393
7.7.2 研究方法	393
7.7.3 地震地层学的发展趋势	396
7.8 地震资料岩性解释和储层预测概述	396
7.8.1 地震资料岩性解释	396
7.8.2 储层参数预测	398
7.8.3 用地震资料作油气预测	401
第8章 几种专门的地震方法	404
8.1 垂直地震剖面法	404

8.1.1 透射波时距曲线	404
8.1.2 VSP 资料处理	407
8.1.3 VSP 资料的解释和应用	412
8.2 多波多分量地震勘探	414
8.2.1 多波地震勘探的理论基础	415
8.2.2 多波地震资料采集	419
8.2.3 多波地震勘探资料处理	421
8.2.4 多波地震资料解释和反演	426
8.3 四维地震勘探	429
8.3.1 四维地震的可行性与研究前提	429
8.3.2 四维地震资料处理方法与原则	431
8.3.3 四维地震资料解释方法	432
8.3.4 四维地震资料应用实例	435
8.4 微震监测	438
8.4.1 微震监测原理	438
8.4.2 微震监测方法简述	440
8.4.3 微震监测的用处	440
8.4.4 发展现状和前景	441
参考文献	442

绪 论

01 勘探地震学概述

勘探地震学是应用地球物理学的一个分支。地球物理学是利用物理学原理研究地球的科学。应用地球物理学则主要研究地壳较浅部分的地层、构造和矿藏,如沉积盆地的大小、基底深度和结构、地层、次级构造单元,背斜、向斜、断层,工程地质涉及近地表地层结构、溶洞,以及铁、铀、煤、油、气、水等矿藏。应用地球物理学包括重力勘探、磁法勘探、电法勘探、放射性勘探及矿场地球物理(测井)方法等。

勘探地震学是利用岩石的弹性性质研究地下矿床和解决工程地质、环境地质问题的一门学科。通常,用人工激发地震波,地震波通过不同路径传播后,被布置在井中或地面的地震检波器及专门仪器记录下来。这些地震波携带有所经过地层的丰富地质信息,计算机对这些地震记录进行处理分析,并用计算机,或人工,或人机对话方式对处理后的地震资料进行解释,便可知道地下不同地层的空间分布、构造形态、岩石性质,直至地层中是否含有石油和天然气等,并可解决大坝基础、港口、路、桥的地基、地下潜在的危险区等工程地质问题,以及环境保护、考古等问题。根据波传播路径不同,地震勘探分为反射波法、折射波法和透射波法等。目前,国内外地震队绝大多数使用反射波法。就所使用的地震波的类型讲,绝大多数是单一的纵波,少数使用多波多分量地震法。某些情况下,使用专门设计的地震方法实现特定的目的,这些专门的地震方法有垂直地震剖面法、垂直电缆法、微地震(又称无源地震)法、井间地震法等^[1, 4, 6~10]。

勘探地震学是为寻找石油和天然气而发展起来的^[1, 4, 6, 50]。几乎所有的石油公司都要依靠地震资料来确定每一口探井和采油井位置,世界上绝大多数油气田都是先由地震工作找到构造,再由钻井发现的,而且,在油气田开发与管理上越来越依赖于地震工作。我国现有油气田绝大多数是根据地震资料进行钻探发现的,就是在光点地震仪年代,在发现克拉玛依油田和大庆油田中,地震勘探也起到了很大作用(王尚文等,1983)。1959年9月26日发现大庆油田的发现井——松基3井,其井位几经变动,反复讨论,最后,在研究了最新一批地震成果后,才由高层领导决策定下了这口至关重要的基准井井位,导致这个世界著名大油田的发现^[38, 39, 40]。正因为如此,地震勘探在石油工业中得到普遍应用。世界地球物理勘探费用里,地震勘探占95%以上;重力、磁法、电法、放射性及测井等地球物理方法的费用加在一起尚不到5%,地震工作在石油工业中举足轻重的地位由此可见一斑。图0-1表示我国地震勘探工作量与油气新增储量的关系^[42]。由图可见二者有明显相关性,表明新增油气储量与地震工作的密切关系。反过来,新油气田的发现也进一步刺激了地震勘探的发展。

目前,世界上还没有一种探测方法能像勘探地震学那样对地下介质作出整体的精确而

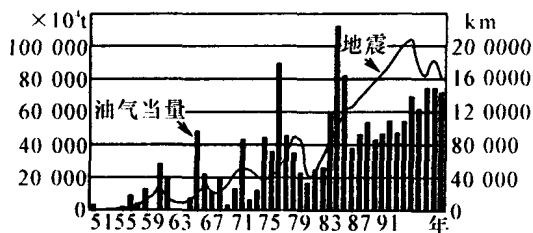


图 0-1 地震勘探工作量与油气新增储量关系图, 3D 地震工作量按 1:10 折算成 2D 地震公里数(据张德忠, 2000)

详细的三维描述,无论是重力、磁法、电法、放射法或测井等地球物理方法,还是钻井、地质等其他方法^[1, 50~51]。就对地层描述的垂向分辨率讲,地震方法远不如测井方法,可惜测井描述的仅仅是沿井壁附近的地层,钻井也是如此。然而钻井是对井孔地层的直接观测,地震勘探是一种间接测量方法,因此,地震资料在进行处理和解释时要用已有钻井数据来标定。地震资料只有在结合钻井、测井、地质及其他地球物理资料进行处理和综合解释后才会获得更可靠的成果。地震所获得的成果正确与否最终也必须用钻井结果来验证。

02 勘探地震学发展简史

勘探地震学是由研究天然地震的地震学孕育而来的。地震勘探作为一种工业方法,在其实现真正工业应用前,经历了漫长的思想与基础理论准备。先驱天才们的科学设想与艰辛的理论探索为勘探地震学奠定了牢固的基础,古代科学家们当初观测研究的是天然地震,这一自然现象给先人们带来巨大的灾难和恐怖。人类最早的天然地震的记载是中国帝舜 35 年(公元前 2221 年)蒲坂(今山西永济县蒲州老城)一带的地震,历史文献记有“(帝舜 35 年)地震泉涌”(《太平御览·咎征部》卷 880),并记有这次地震前后发生的宏观异常现象——“龙生庙,犬吠乎市,夏冰,地坼及泉,五谷变化”(《墨子·非攻下》卷 5)^[3]。这比西方文献记载的古埃及最早地震记载早 21 年。

公元 132 年东汉时的张衡发明了世界上第一台地震仪——当时叫“地动仪”。世界著名自然科学史家,英国人李约瑟在其巨著《自然科学史》中指出“地震仪的鼻祖出在中国,这一点是无可置疑的,这就是……张衡……不少西方地震学家,如 Milne, Sieberg 和 Berlage 等都曾坦率地承认张衡在这方面的巨大功绩”^[2]。前苏联著名地球物理学家 И. И. 顾尔维奇教授曾明确指出张衡发明的地动仪是世界上第一台地震仪,同时指出它的结构已具备现代地震仪的基本特点^[4]。1760~1761 年,剑桥大学 J. Michell 提出地震的振动是弹性波传播所致。1818 年,Baron Cauchy 关于波的传播理论的研究报告获得了法兰西研究院最高奖,约在 1828 年, S. D. Poisson 从理论上证明了 P 波和 S 波都可独立存在。1841 年,苏格兰人 J. D. Forbes 发明了一台地震仪,不久又发明了一台粗糙的振动自动记录器^[1]。他这台地震仪比张衡的地动仪晚了 1 700 年。1846 年,爱尔兰人 R. Mallet 提出了地震波反射、折射的概念,并提出关于将地震观测应用于解决地质问题的设想;1948 年他进而提出用炸药

激发人工地震,并记录下人工地震波的特征,用以研究地质问题的建议。这无疑是人类首次提出用人工地震研究地壳浅层结构的设想,即地震勘探法设想。接着 R. Mallet 在 1949 年发明了一种检波器。1876 年,美国人 H. L. Abbott 用 5 000 磅黄色炸药人工激发地震波,并测量了地震波的速度。1881 年,英格兰人 John Milne 及其合作者在日本用落重法激发地震波,因此,他成为现代落重法非炸药震源的创始人。1899 年, C. G. Knott 的一篇论文发展了界面上反射波和折射波的理论。

在 19 世纪最后 10 年到 1914 年第一次世界大战爆发,地震学理论取得了巨大进展。这期间各国科学家作出了许多重要贡献,其中包括俄国的加里津,日本的 F. Omori,南斯拉夫的莫霍洛维奇,英国剑桥大学的 J. W. Strutt, A. E. H. Love, 以及德国格丁根大学地球物理研究院 E. Wiechert 组织的一个国际地球物理学家组,他的合作者和学生中有 L. Geiger, B. Gutenberg 及 L. Mintrop。他们在地震理论不同方面的杰出成就(虽然研究的是天然地震)为后来的勘探地震学的发展奠定了理论基础。1907 年, E. Wiechert 和 K. Zoeppritz 完成了地震波传播理论研究,其著作《地震波》给出了关于地震波传播、反射和透射的解。

在第一次世界大战前,科学家已为地震勘探的诞生做好充分的理论准备,事实上,第一次世界大战前,地震的理论研究工作已远远走在试验工作的前头。

任何工业方法都是为适应社会经济发展的需要而产生的,地震勘探方法是由战争催生的,并为适应战后经济发展而最终形成。

1912 年 4 月 14 日午夜 Titanic 号在其处女航中撞上冰山沉没,使 1 635 人罹难。这次巨大的海难是船撞冰山发生的,它促使人们需要一种探测冰山的方法,以避免类似悲剧的重演。就在 Titanic 沉没后,著名发明家、美籍加拿大人 R. A. Fessenden 研究了探测冰山的方法,同年晚期,即发明了用声波探测冰山的方法和仪器,并进一步认识到这种方法用于确定地下矿体位置的潜力。1914 年他提出了声波探测器的专利申请,是第一次确定无疑地利用反射波的方法。1917 年 7 月 15 日,他在美国申请了“用于确定矿体位置的方法和装置”的专利(专利号 1240328),并于 1917 年 9 月 18 日获得批准^[1]。

第一次世界大战期间(1914~1918 年),协约国和德国双方都完成了一项技术研究,即根据重炮发射时因反冲而产生的地震波,从而确定炮群位置的方法和仪器。参加这项工作的有 L. Mintrop, B. McCollum, J. C. Karcher 及 E. A. Eckhardt 等人,战后,这些人都为地震勘探方法的形成作出了开拓性贡献^[1]。

第一次世界大战结束后,经济恢复对石油的需求迅速增长,而用地面地质的方法寻找石油的收益却开始下降,地震方法便应运而生了。

1919 年德国人 L. Mintrop 在德国申请了地震折射波法专利。同年,他和 K. Lehmann 改进了地震仪,并成功地进行了测定煤层深度的实验。1920 年 10 月,在德国汉堡附近 Mintrop 围绕 Neuengamme 气井作了地震折射波法测量,并指出附近有个浅层盐丘,为了证实这个发现,钻了一口 436 英尺深的井,但失败了。后来的钻探证明,当时 Mintrop 测定的该盐丘位置偏离了几百英尺。1921 年 4 月, Mintrop 得到五个大钢铁和冶金公司的支持,成立了一家地震公司 Seismos Gesellschaft,这是作为一种工业的地震勘探的正式开始。Mintrop 地震公司先是在欧洲活动了一个时期,后来便移师美洲。1 号队 1923 年 3 月至 1924 年 3 月在墨西哥为 Shell 的“Aguila”公司工作,但无果而终, Mintrop 亲率 2 号队赴美国开展工

作。1923年7月至1925年11月为Marland石油公司在墨西哥湾地区作折射波法勘探,也无成果。1号队在1924年春也移到美国,为海湾石油公司在得克萨斯海湾地区工作,1924年11月在Fort Bend郡的一口石油探井准确地按地震资料预测深度钻到盐丘的岩帽,发现了Orchard盐丘,同年12月这口井作为产油井投入使用。这个油田后来就叫Orchard油田。这是世界上第一个地震勘探发现的油田。这个成功大大鼓舞了各个石油公司应用地震勘探的兴趣。1925~1930年间,Gulf公司、Shell公司等多家大石油公司先后雇用Mintrop地震公司的地震队,发现一系列盐丘,其中一些被钻探证实产油,其中包括一些高产井,Mintrop地震公司的地震队也随之增加。在1926年前,Mintrop的地震公司事实上垄断了美国的地震勘探^[1,34]。这一时期,Mintrop使用的地震折射波法是初至折射法,当时用的是机械地震仪,采用剖面法进行观测,1926年以后,则采用扇形排列法工作。Mintrop的地震折射波法开始了石油勘探革命,一系列的钻探成功,引发了地震折射法的大规模应用。尽管在Mintrop前已有Mallet等人指出利用地震波解决地质问题的设想,并有人做过原始的人工激发和观测记录地震波的试验,但真正将地震勘探置于工业基础之上的是Mintrop,是他组建了世界上第一个地震公司(虽然最初只有两个队),真正开展了地震勘探的工业应用。

Mintrop当时使用的虽然是灵敏度很低的机械地震仪,但Mintrop检测的是人工激发出的地震波里最易于识别的初至折射波,这是折射波法先于反射波法获得工业应用的主要原因。Mintrop的成功还在于他的地震公司成立不久便将活动范围扩展到大洋彼岸。开始在欧洲试验,不久转移到北美洲作商业性服务,这使地震勘探一开始便在广阔的世界舞台上活动,有了这个大背景,他才有机会选择地震地质条件有利的工区。这看起来像是偶然的,其实有其必然性。工区内丰富而特殊的地下构造适合于他当时使用的初至折射法。

在Mintrop的折射波兴起和迅速发展的同时,反射波法亦在萌发之中。1919年,Karcher和McCollum申请了3项有关地震反射波法的专利。1920年4月,W. P. Hase-man与Karcher,Eckhardt,McCollum等组建了地质工程公司(Geological Engineering Company),志在从事地震反射波法的商业勘探。

1920年6月9日,英国皇家学会会员J. W. Evans和W. B. Whiteley在英国申请了“地壳内部构造研究方法的改进”专利,并于1922年获得批准。这份专利明确地提出了地震反射波勘探方法。

1920年以前,Karcher已做过多次人工地震方法试验,包括观测反射波的试验。1921年7月,Karcher和Haseman等在美国俄亥拉荷马市附近Arbuckle山一带进行了反射波法试验性勘测。当时,他们使用了电动式检波器,并用一台示波器改装成3道的记录仪。他们在已知的Vines Branch背斜上作了一个地震反射法剖面,获得一些清晰的反射波记录,并作出了Viola顶面构造的剖面图,当时采用的野外工作方法是:离检波器每隔100英尺放一炮,沿剖面布置一系列炮点施工^[1,35]。

1922年,由于油价下跌,地质工程公司出现亏损,难以维持下去,除McCollum外,其他人都回到各自原来工作岗位。1925年5月,Amerade Rycade与Karcher创建了地球物理研究公司(Geophysical Research Corporation (GRC))。1926年GRC与Fessenden签订了一个条约,GRC获得了Fessenden的专利“用于确定矿体位置的方法和装置”,并且聘Fessenden为顾问。公司成立时,便把发展反射波法技术定为公司的主要目标,尽管其商业

活动仍然是折射波法。GRC 的多个地震队在从事折射波法勘探的同时,也在断断续续进行反射波法试验,但在 1928 年前,GRC 的几个地震队在不同地区所作的反射波记录的质量是非常不稳定的。事实上,由于检波器和地震记录仪器的性能,加上野外工作方法不适当,这一时期的反射波法一直是试验性的。1929 年,GRC 的一个地震队在 Louisiana 的海湾地区对已知 Darrow 盐丘进行详查,这个队用“测定倾角观测系统”进行反射波法勘探,根据反射波法作出了构造图,所钻的第一口探井见到工业油流,从而发现了 Darrow 油田,接着又陆续钻了一些井。这些井表明,反射波法作出构造图比折射波法和扭称作出的构造图精度都高,从而开始显示出反射波法的优点。1929 年秋,GRC 再次进入 Oklahoma 州的 Seminole 地区,用反射波法找到了几个小构造。1930 年根据钻探结果在其中的三个构造上发现了三个重要的油田。这些重要的发现证明了地震反射波法的有效性和工业价值。因此,地震反射波法很快成为石油勘探中占主导地位的勘探方法。

大约在 1930 年前,反射波法的仪器得到了改进,可记录下两个地震道,同时可记录爆炸信号。人们已经知道要得到良好的反射波记录应在潜水面下引爆炸药激发地震波,钻井机代替人工挖炮坑,使潜水面下激发成为可能。采用浅层折射法获取低速带参数进行静校正等,提高了地震构造图的精度。野外工作方法及解释方法上的这些改进,使反射波法终于取得成功,反射波法的成功又加快了反射波法的发展。Karcher 于 1930 年新成立了地球物理服务公司(GSI),对地震仪作了多项重要改进。到 1930 年末,地震仪器记录系统已达到 12 个地震道,并采用了道间混波,每道用 6 个甚至更多个检波器组合;排列采用包括连续排列法在内的多种观测系统^[1, 8, 10]。

在此期间 Mintrop 的地震公司在改进地震仪器和野外数据采集方法上动作迟缓,而新建的美国地震队在仪器装置和野外工作方法上发展迅速,并与德国人展开激烈竞争。反射波法也已确定了自己的地位。很快,Mintrop 的地震公司失去优势,1930 年后,这个曾启发并带动美国地震工业发展的德国人便被挤出了美国石油勘探市场,只好回到欧洲继续他的折射波法勘探,从此辉煌不再。

值得指出的是,1930 年前苏联学者 Г. А. 甘布尔采夫彻底改进了折射波法,创造了“对比折射法”,不仅记录利用初至折射波,还可对比追踪出中深层界面产生的折射波,大大改进了地震折射波法,提高了精度,加深了勘探范围^[4, 9]。20 世纪 50 年代中期,折射波法达到它发展的鼎盛时期。然而,由于地震折射波法的固有缺点,如折射波法会漏掉大部分地层界面,地面观测折射波存在盲区等,这些使地震折射波法在勘探上具有很大局限性,因此,它在石油勘探中逐渐失去了优势。虽然它不再是主要的地震勘探方法,但仍作为一种重要的物探方法在使用,直到 20 世纪 50 年代末。由于它具有能直接计算出折射界面下地层速度等优点,直到今天地震折射波法在低速带测量和地壳测深等方面仍然是不可缺少的方法。

20 世纪 30 年代,反射波法取得的良好效果,使美国在短时间内出现了多家地球物理勘探公司,它们互相竞争,使反射波法快速发展起来,在美国陆续发现一系列大油田。到 1940 年,出现了 24 道地震仪,并具有带通滤波性能的自动增益放大器,多道混波能力,还采用了震源组合激发地震波。

1945 年第二次世界大战结束后,工业对能源的需要迅速增长,使石油物探成了一种繁荣的产业。20 世纪 50 年代初,地震勘探发生了革命性变化:1952 年 Mobil 公司制成了世界上第一台模拟磁带地震仪(12 道),及相应的室内资料处理用的磁带回放仪^[1]。磁带地震仪

的出现,带动了数据采集方法的重大进展,它使得共深度点(CDP)法得以真正的广泛的应用,其实,早在1950年6月W. Harry Mayne就提出CDP法专利申请^[1,8]。非炸药震源也因模拟磁带地震仪的出现而迅速发展推广;1955年美国至少有7个地震队使用锤击震源(Thumper);1959年至少有15个地震队使用落重法(Weight-Dropping),事实上,1881年英国人Milne在日本就曾用落重法激发地震波,但只是到磁带地震仪问世后,这一方法才得到真正的工业应用^[1,11,33]。最重要的陆上非炸药震源,即可控震源(Vibroseis)也在1953年由M. Crawford等制成并首次使用,并在20世纪60年代初得到普遍应用,到了90年代初,国外陆上地震勘探可控震源队已占陆上地震队的一半^[56]。直到今天,它仍是最重要的陆上非炸药震源^[10,26]。在60年代中期,海上出现了多种非炸药震源,如空气枪震源、电火花震源、蒸汽枪震源等。这些新式震源的应用不仅提高了地震生产效率,扩大了地震勘探的适应范围,也保护了自然环境。

模拟磁带地震仪和磁带回放仪的出现,使地震记录得以在室内反复处理和再加工,大大改善了地震资料的质量,明显提高了地震成果的精度和效果,这是地震技术的一次质的进步。1959年10月,Texas仪器公司的广告上刊登出“第一套全晶体管24道地震仪”,它基于当时正蓬勃发展的固体电子学。1958年集成电路的发明,产生了第三代电子计算机;1967年出现的大规模集成电路,产生了第四代电子计算机。在计算机科学技术快速进步的背景下,勘探地球物理学随之发生了计算机革命。20世纪60年代,Texas仪器公司和Mobil公司等联合开发了数字地震仪,在1968年2月,Texas仪器公司已推出了DFSⅢ数字地震记录系统,同时(1968年2月)Leach提供的最新数字地震记录系统可达到64道。到60年代末,48道数字地震记录系统似乎已成为“标准”系统,取代了已流行约30年的24道地震仪器系统。地震勘探正稳步向全数字化方向迈进。1974年Amoco公司的Broding描述了一种新的地震记录系统(SGR),这种仪器给每组记录器配置一个磁带卡盘,而不需要数据传输电缆。1978年,Phillips石油公司推出了新的无线电遥测系统(Opseis 5500),它以无线电遥测电路代替了数据电缆。到70年代末,地震数据采集系统已能同时记录1000个地震道。近些年来,由于3D地震,特别是海上3D地震的发展,为降低成本,要求增加拖缆数目和放炮次数,高分辨地震和高质量成像技术也都要求高密度采样,这推动了超多道地震仪的发展。在计算机科学进步的支持下,I/O,Western Geoc,PGS-Tensor等大公司推出了超万道地震仪,陆上已有3万道地震仪。目前,超万道地震仪已投入实际应用。

随着磁带地震仪和数字地震仪的发展,地震数据处理技术也随之发展起来。1953年,美国麻省理工学院有人研究应用信息论和电子计算机处理地震资料,人们开始发明了各种处理方法,从噪音背景中提取信号。到60年代初期,勘探地震学更广泛地引进了信息和计算机科学的成果,进一步发展了地震资料数字处理方法。为了解决复杂构造的成像问题,要求反射信号能正确归位。大型高速计算机的发展为归位(偏移)技术准备了良好的条件。早期是在时间场归位(偏移),1971年Claerbout首先提出基于标量波动方程的有限差分偏移真法,他的开拓性工作迅速被广泛采用,并发展出多种可供选择的方法。地震资料数字处理方法不仅明显提高了构造解释的可靠性,而且可以从地震数据里提取各种信息,使地震勘探不仅可解决构造问题,而且可以研究岩性和储层的某些物性,使勘探地震学演进到开发地震学。

20世纪50年代末,苏联人Н. Я. Бамаx等已提出关于油-水接触面及气-液接触面产生