

· 中国石油大学（华东）“211工程”建设重点资助系列学术专著 ·

地震叠前成像 理论与方法

李振春 等 编著

中国石油大学出版社



中国石油大学(华东)“211 工程”建设重点资助系列学术专著

地震叠前成像 理论与方法

李振春等 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震叠前成像理论与方法/李振春等编著. —东营:
中国石油大学出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-5636-3566-5

I. ①地… II. ①李… III. ①叠前偏移—地震层析成
像—研究 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 174982 号

书 名: 地震叠前成像理论与方法
作 者: 李振春等

责任编辑: 王金丽 (0532—86981532)
封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com
印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司
发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0532—86981532, 0546—8392563)
开 本: 180 mm×235 mm 印张: 17.5 字数: 391 千字
版 次: 2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
定 价: 50.00 元

总 序

“211工程”是新中国成立以来,由国家立项展开的规模最大、层次最高的高等教育建设工程,是国家为振兴高等教育、建设人力资源强国而做出的重大教育发展决策。“211工程”抓住学科建设、师资队伍建设和决定高校水平提升的核心内容,通过重点突破带动高校整体发展,探索了一条高水平大学建设的成功思路。经过十多年的努力,“211工程”取得了显著成效,在学科建设、人才培养、科技创新等方面取得了丰富成果,使中国的高等教育产生了重大变化,大幅度拉近了我国高等教育与世界高等教育的距离,对于相关高校整体水平的提升产生了巨大的推动作用。

1997年,中国石油大学跻身“211工程”重点建设高校行列,形成了学校更好地开展高水平大学建设的重大历史机遇。经过“九五”、“十五”两期建设,进入“十一五”第三期建设,三期建设有机衔接,从重点学科建设到学科群建设,再到创新队伍建设和创新人才培养,学校“211工程”建设始终围绕提升学校水平这个核心,不断拓展建设思路和建设内容,其“以优势带整体,以特色促水平”的建设思想与学校发展整体思路实现了高度吻合。所以,十多年来,“211工程”建设的轨迹就是标识学校发展的一条主要线索。

“211工程”建设所取得的成效带来了学校办学水平的全面提升。依托“211工程”,经过十多年的建设和发展,学校主干学科优势和特色更加突出,带动了相关学科水平的提高,学科结构更加优化,学校进一步获得了国家对“优势学科创新平台”项目建设的支持;师资队伍建设和成效显著,高层次人才明显增加,特别是培育发展起一些高水平团队;科技创新能力大幅提升,突出了在基础理论研究、应用研究等方面的优势,已初步建立起有学校特色的科技创新体系,在十多个研究领域居国内领先水平,有些达到国际先进水平,科技成果转化取得巨大社会效益和经济效益;人才培养质量明显提高,逐步建立起以素质教育为主导的科学的教育教学体系,有效保证了创新人才的培养;国际学术交流与合作不断深入,学校开放办学和国际化程度得到大大推进;办学条件大幅改善,建成了先进的公共服务系统,形成了良好的软硬条件支撑。总体上,在“211工程”建设的推动下,办学水平大幅提升,学校办学特色更加鲜明,开创了学校建设高水平大学的良好局面。

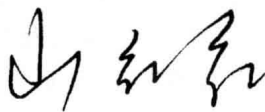
“211工程”建设所取得的经验是学校办学的宝贵财富。首先,重点突破的策略保证了学校可以抓住影响办学水平的学科建设、创新能力等重点工作和任务,集中资源、队伍和时间进行重点建设及发展,有效提升了学校的核心竞争力;其次,滚动发展的思路保证

了学校找准优势并不断强化优势,以点带面不断完善整体结构,促进了学校的协调发展和可持续发展;另外,以项目为平台进行系统组织的机制保证了学校加强统筹规划、资源集成、队伍整合,加强了对各个环节、各种因素的系统优化,建立了一系列行之有效的工作制度。

“211工程”建设也锻炼形成了一支甘于奉献、勇于创新队伍,促进了全校在这样一个综合平台上的协同配合。在十多年的建设过程中,许多同志全身心投入有关工作,坚持不懈地追求更高水平和更高目标,有关部门协调一致,切实保证了各项建设任务的顺利实施。所以“211工程”也是学校的一项事业工程、合力凝聚工程。

学校现在已经展开“211工程”三期建设,同时正在进入建设“国内著名、石油学科国际一流的高水平研究型大学”的奋斗征程,“211工程”建设将继续成为学校实现新的发展目标的重要支撑。总结前期“211工程”建设的成功经验,充分展示“211工程”建设的丰富成果,对于更好地推动“211工程”建设,实现学校的奋斗目标,具有重要的现实意义。为此,学校决定设立专项资金,资助出版“211工程”建设有关的系列学术专著,分门别类地介绍和展示学科建设、学术发展、科技创新和人才培养等方面的成果和经验。虽然“211工程”建设作为一项综合性的重大工程,对其进行系统全面的总结存在一定难度,但相信这套丛书完全可以从不同的侧面、从一些具体的内容,展示我校“211工程”建设的巨大成绩和发展思路,对今后“211工程”建设和学校总体发展起到应有的启示和促进作用。

中国石油大学(华东)校长



二〇〇八年十月

前言

随着地震勘探难度的增大和油气藏复杂性的增加,油气勘探和开发对地震资料精度的要求愈来愈高。为实现高精度地震资料在油气藏勘探和开发中的应用,近年来地震方法和技术重点发展了两个方向:一是地震成像技术,二是开发地震技术。地震成像技术是以三维叠前深度偏移为代表,由此实现高精度地震成像,以直接研究油气储层;开发地震又叫储层地球物理,它是以四维地震(也称为时间延迟地震)为代表,由此实现油藏动态监测,进而为油气田的进一步开发提供可靠的地球物理依据。

考虑到地震资料在油气藏勘探和开发中的地位愈来愈重要,近年来,在地球探测与信息技术专业硕士研究生中已开设了“地震资料数字处理”专业学位课,鉴于保幅处理在地震处理中的重要作用和地震偏移成像是实现保幅处理的主要技术,作者编著了《地震叠前成像理论与方法》教材,以适应地球探测与信息技术专业地球物理勘探方向研究生学习“地震资料数字处理”课程的要求。

全书共分十二章,第一章是绪论,简单介绍地震成像发展史和地震叠前成像主要方法技术,由李振春编写;第二章讲述地震偏移成像基础,由李振春、郭朝斌、郭振波编写;第三章讨论地震波场正演模拟,由李振春、张慧、贾立坤编写;第四章简述叠前保真处理,由李振春、郭恺、董烈乾编写;第五章介绍共反射面元成像,由李振春、孙小东、李栋编写;第六章重点分析叠前时间偏移,由李振春、岳玉波、刘玉金编写;第七章系统阐述叠前深度偏移,由李振春、曹文俊、张凯、黄建平、张敏、孔雪、秦宁编写;第八章讨论逆时偏移,由孙小东、张慧、张春燕编写;第九章介绍多次波成像,由李振春、郭书娟、李志娜编写;第十章论述双复杂条件下地震叠前成像,由张凯、岳玉波、雷秀丽编写;第十一章简述复杂介质地震叠前成像,由黄建平、周学峰编写;第十二章分析 GPU 技术在地震叠前成像中的应用,由李振春、马庆珍编写。全书由李振春教授通稿。

地震叠前成像理论与方法的一些基础知识已在本科教材《地震数据处理方法》中阐述,在此不再重复。

本教材除了可以作为地球探测与信息技术专业地球物理勘探方向研究生的“地震资料数字处理”专业学位课的教材外,还可作为相关专业研究生和物探技术人员的参考书。

在编写过程中,得到了中国石油大学(华东)的重点资助和地球科学与技术学院的大力支持以及地球物理系各位老师的帮助;另外,地震成像方法研究课题组的研究生们除了完成上述部分章节的编写工作外,还完成了大部分的文字打印和图件绘制工作。在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者数理和地球物理专业水平有限,书中一定有许多不妥之处,望专家和同行批评指正。

编著者

2011年3月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 地震偏移成像技术发展史	1
1.1.1 古典的偏移成像阶段	1
1.1.2 早期的计算机偏移成像阶段	1
1.1.3 波动方程偏移成像阶段	2
1.2 地震偏移成像方法简介	2
1.2.1 地震叠后偏移成像方法	2
1.2.2 地震叠前偏移成像方法	3
1.3 地震叠前偏移技术及其展望	5
1.3.1 单程波叠前偏移	5
1.3.2 弹性波叠前偏移	5
1.3.3 多次波成像	5
1.3.4 绕射波成像	6
1.3.5 复杂条件下叠前偏移	6
1.3.6 保幅叠前偏移	6
第二章 基础知识	9
2.1 有限差分法基础知识	9
2.1.1 差分方程的建立与求解	9
2.1.2 收敛性、相容性和稳定性	13
2.2 双平方根方程简介	14
2.2.1 观测排列延拓的概念	14
2.2.2 波场外推基础	15
2.2.3 双平方根方程的推导	16
2.3 Born 近似和 Rytov 近似	18
2.3.1 Born 近似	18
2.3.2 Rytov 近似	18
2.3.3 Born 近似和 Rytov 近似的基本特点	19

2.4 de Wolf 近似	20
2.4.1 Lipmann-Schwinger 方程	21
2.4.2 散射序列的重新归一化和 de Wolf 近似	22
第三章 地震波场正演模拟	24
3.1 概述	24
3.2 交错网格任意 $2N$ 阶精度有限差分数值离散	25
3.3 声波方程地震波场模拟算法	26
3.4 弹性波方程地震波场模拟算法	27
3.5 粘弹性介质地震波正演模拟	29
3.5.1 Kelvin-Voigt 粘弹性单元体	29
3.5.2 二维粘声波方程	30
3.5.3 二维粘弹性波方程	31
3.6 各向异性介质的地震波场模拟算法	32
3.7 地震散射波场正演模拟	34
3.8 基于时空双变网格的地震波正演模拟	34
3.9 数值算例	35
3.9.1 声波正演模拟算例	35
3.9.2 弹性波正演模拟算例	37
第四章 叠前保真处理	40
4.1 保幅去噪	40
4.1.1 保幅性与信噪比的关系及影响保幅的因素	41
4.1.2 相对保幅去噪方法	42
4.2 保幅反褶积	44
4.2.1 谱模拟反褶积	45
4.2.2 频率、相位可控的反褶积	48
4.3 叠前保真处理	49
4.3.1 时差校正	50
4.3.2 振幅校正	51
4.3.3 相位校正	52
4.3.4 频率校正	53
4.3.5 波形校正	54
第五章 共反射面元成像	57
5.1 共反射面元叠加	57
5.1.1 二维 CRS 叠加	57
5.1.2 三维 CRS 叠加	62

5.1.3 模型试算和实际资料试处理	63
5.2 共反射面元偏移	67
5.3 共反射面元速度分析	68
5.3.1 层剥离法共反射面道集偏移速度分析	68
5.3.2 共反射面道集层析速度分析	69
第六章 叠前时间偏移	73
6.1 Kirchhoff 叠前时间偏移	74
6.1.1 Kirchhoff 叠前时间偏移基本原理	74
6.1.2 弯曲射线走时算法	75
6.1.3 关键技术	77
6.2 波动方程法叠前时间偏移	80
6.2.1 相移法叠前时间偏移	81
6.2.2 偏移距域平面波叠前时间偏移	85
6.3 基于共散射点道集的叠前时间偏移及速度分析	88
6.3.1 概述	88
6.3.2 基于等价偏移距的单平方根旅行时方程	88
6.3.3 CSP 道集的叠前时间偏移及速度分析	90
6.3.4 CSP 道集的特点与优势	91
6.3.5 模型试算	91
6.3.6 实际资料处理	92
6.4 本章小结	94
第七章 叠前深度偏移	98
7.1 基于射线理论的叠前深度偏移	98
7.1.1 Kirchhoff 积分法叠前深度偏移	99
7.1.2 高斯束叠前深度偏移	104
7.1.3 最小二乘法叠前深度偏移	109
7.2 波动方程法叠前深度偏移	114
7.2.1 概述	114
7.2.2 共炮集波动方程叠前深度偏移思路	115
7.2.3 频率-空间域有限差分法波动方程叠前深度偏移	117
7.2.4 分步 Fourier 法波动方程叠前深度偏移	126
7.2.5 Fourier 有限差分法波动方程叠前深度偏移	130
7.2.6 广义屏法叠前深度偏移	138
7.2.7 双聚焦法叠前深度偏移	146
7.3 叠前深度偏移速度分析	153
7.3.1 引言	153

7.3.2 剩余曲率分析	153
7.3.3 深度聚焦分析	165
7.3.4 基于CFP道集的叠前深度偏移速度分析	166
7.3.5 速度分析小结	170
第八章 逆时偏移	178
8.1 高斯束法逆时偏移	178
8.1.1 基本原理	178
8.1.2 模型试算	180
8.2 波动方程法逆时偏移	181
8.2.1 一维逆时偏移理论	182
8.2.2 二维逆时偏移理论	184
8.2.3 最小二乘逆时偏移	186
8.2.4 常规二维弹性波动方程逆时偏移理论	186
8.2.5 边界条件和成像条件	188
8.2.6 模型与实际数据测试	189
8.2.7 小结	192
8.3 基于叠前逆时偏移的速度分析	193
8.3.1 概述	193
8.3.2 逆时偏移角度域共成像点道集	194
8.3.3 剩余曲率分析	195
8.3.4 模型试算	196
第九章 多次波成像	201
9.1 利用表层多次波构建准一次波实现多次波成像	202
9.1.1 利用表层多次波构建准一次波并实现表层多次波成像方法原理	202
9.1.2 模型试算	203
9.2 广义炮偏移一次波和表层多次波联合成像	205
9.2.1 一次波和多次波同时进行叠前深度偏移方法原理	206
9.2.2 模型试算	206
9.3 叠前逆时偏移进行多次波成像	207
9.3.1 叠前逆时偏移的基本原理	208
9.3.2 模型试算	208
第十章 双复杂条件下叠前成像	212
10.1 起伏地表叠前时间偏移	212
10.1.1 起伏地表叠前时间偏移	212
10.1.2 起伏地表等效偏移距叠前时间偏移	215

10.2 起伏地表叠前深度偏移	217
10.2.1 概述	217
10.2.2 波动方程基准面校正	217
10.2.3 “零速层”法	218
10.2.4 “逐步-累加”法	220
10.2.5 起伏地表条件下保幅高斯束偏移	224
10.3 起伏地表叠前逆时偏移	231
10.3.1 三角网格法	231
10.3.2 边界条件	232
10.3.3 模型算例	233
第十一章 复杂介质地震叠前成像	237
11.1 非均匀介质地震叠前成像	237
11.1.1 概述	237
11.1.2 逆散射成像的基本原理	238
11.1.3 模型试算	239
11.2 非弹性介质地震叠前成像	242
11.2.1 概述	242
11.2.2 二维 F-X 域粘弹性介质波动方程保幅偏移基本原理	243
11.2.3 模型试算和实例分析	245
11.2.4 结论及讨论	247
11.3 各向异性介质地震叠前成像	247
11.3.1 地震各向异性概述	247
11.3.2 各向异性地震速度分析	248
11.3.3 各向异性地震叠前保幅偏移	252
第十二章 GPU 技术在地震叠前成像中的应用	257
12.1 地震成像与高性能计算	257
12.2 地震叠前成像与 GPU 加速	259
12.2.1 非对称走时 Kirchhoff 叠前时间偏移的 GPU 实现	259
12.2.2 基于 GPU 的叠前深度偏移	259
12.2.3 模型测试	261
12.3 逆时偏移的 GPU 加速	262
12.3.1 方法原理	263
12.3.2 数据试算	264
12.3.3 复杂模型计算	264
12.4 本章小结	266

第一章 绪 论

地震成像是现代地震勘探数据处理的重要组成部分,分为叠加成像和偏移成像。近年来,随着油气勘探难度的增大和地质目标复杂性的增加,使地震叠前成像技术得到了快速的发展,并已成为高精度地震勘探数据处理的关键技术。其中的共反射面元(CRS)成像技术已有 CRS 叠加成像发展为 CRS 偏移成像,该技术的理论与方法将在第五章详细论述。有关正演模拟、叠前处理和速度分析的理论与方法将在相关章节详细讨论。下面重点介绍地震偏移成像技术发展史、地震偏移成像方法和地震叠前偏移技术及其展望。

1.1 地震偏移成像技术发展史

从本质上说,地震偏移成像是利用数学的手段使地表或井中观测到的地震数据反传播,消除地震波的传播效应得到地下结构图像的过程。研究地震偏移成像技术的发展史,不仅有利于了解偏移成像本身的理论和技术进展,而且对于整个地震勘探发展史也会有更深入的认识。

1.1.1 古典的偏移成像阶段

20 世纪 60 年代以前是古典偏移成像阶段。该阶段是勘探地震学初创并缓慢发展的阶段,地震偏移成像技术是一种手工操作的制图技术,只能求得地下反射点的空间位置,而不考虑反射波的特点。

1.1.2 早期的计算机偏移成像阶段

20 世纪 60 年代到 70 年代是早期的计算机偏移成像阶段。该阶段的偏移成像是随着计算机技术的出现而发展起来的。尽管这些偏移方法使用了波前、绕射等地震波传播的惠更斯原理,但只是定性的、概念性的。偏移剖面的质量仅仅能够满足最基本的要求。

1.1.3 波动方程偏移成像阶段

20 世纪 70 年代以后勘探地震学进入了波动方程偏移成像阶段。40 年来波动方程偏移技术得到了长足发展并不断完善,在实现对地震波运动学特性精确成像的同时,实现了对地震波动力学特性的保真成像。国内外很多地球物理学家对于波动方程偏移成像的理论和技术的发展作出了重要贡献。

1.2 地震偏移成像方法简介

1.2.1 地震叠后偏移成像方法

地震偏移按所处理的地震资料是否作过水平叠加可分为叠后偏移和叠前偏移。叠后偏移是在共中心点叠加数据上进行零炮检距剖面偏移。从成像结果的表示上,地震叠后偏移分为叠后时间偏移和叠后深度偏移。叠后时间偏移是假设介质横向速度不变,仅仅把绕射波收敛到绕射曲线顶点上的成像方法,成像结果表示在时间域。叠后深度偏移适应介质横向速度变化,把接收到的绕射波收敛到产生它的绕射源上,成像结果表示在深度域。

1.2.1.1 叠后时间偏移

叠后时间偏移是目前工业界使用最普遍的偏移方法之一。从叠后时间偏移原理来考虑,叠后时间偏移可以分为射线偏移和波动方程偏移两大类。

1) 射线偏移

射线偏移是以几何地震学和波的绕射理论为基础,实现反射波和绕射波的空间归位处理。射线叠后偏移方法可分为圆弧切线法偏移、波前模糊法偏移和绕射扫描叠加法偏移。下面以绕射扫描叠加偏移为例介绍射线法的叠后偏移原理。

绕射扫描叠加偏移是基于如下原理:将输出的叠加剖面剖分离散化,每个离散网格点都假设成一个绕射点,按零炮检距绕射双曲线公式可在像空间找到一条对应的双曲线,沿双曲线轨迹取波的振幅并叠加起来,将叠加结果置于目标空间对应的网格点上。

2) 波动方程偏移

波动方程叠后偏移是基于爆炸反射面成像原理,即把地下反射界面视作爆炸源,假定在零时刻所有的爆炸反射界面同时起爆,发射上行波到达地面各观测点。若利用波动方程将地面测得的地震波场作向下延拓,零时刻的波场值正确地描述了地下反射界面的像。基于波动方程的叠后偏移方法主要分为三大类:有限差分(FD)法波动方程偏移、频率-波数(F-K)域波动方程偏移和克希霍夫(Kirchhoff)积分法波动方程偏移。因有关的方法原理已在相关参考文献中介绍,在此不作赘述。

1.2.1.2 叠后深度偏移

叠后深度偏移可以有效解决构造不太复杂、横向速度变化较大的地质体的地震成像问题,并能提高偏移成像的计算效率,因而在工业界仍发挥着重要作用。目前,常用的叠后深度偏移方法有 Kirchhoff 积分法、分步傅里叶(SSF)法、FD 法以及逆时偏移(RTM)法等。这些方法的基本原理见相关参考文献。

1.2.2 地震叠前偏移成像方法

1.2.2.1 叠前时间偏移

从原理和适用性上分析,叠前时间偏移是基于绕射叠加或 Claerbout 反射波成像原则,是一种成像射线成像,能够解决叠后时间偏移存在的问题。下面简述叠前时间偏移的几种主要方法,其他方法从略。

1) Kirchhoff 积分法叠前时间偏移

Kirchhoff 叠前时间偏移的基础是计算地下散射点的时距曲面。根据 Kirchhoff 绕射积分理论,时距曲面上的所有样点相加就得到该绕射点的偏移结果。Kirchhoff 叠前时间偏移假设震源点到绕射点和绕射点到检波点的射线路径为直射射线或弯曲射线,总旅行时等于震源点到绕射点的旅行时加上绕射点到接收点的旅行时。

2) 波动方程法叠前时间偏移

(1) 平面波分解法叠前时间偏移

该方法先对叠前数据作拉冬变换,将波场分解为平面波,组成共入射角剖面,然后对每个共入射角剖面作偏移,得到叠前时间偏移结果。这种方法不会改变波场的振幅和相位,能够真正实现保振幅偏移,提高成像剖面的空间分辨率。

(2) F-K 域叠前时间偏移

F-K 域偏移是实现叠前时间偏移的一种有效方法。使用横向不变的速度偏移常炮检距数据可以在 Fourier 域进行,优点在于算子考虑了由于通过层状介质而发生折射弯曲所造成的相位和振幅变化。

1.2.2.2 叠前深度偏移

常见的叠前深度偏移方法可以分为两类:第一类是基于射线理论的叠前深度偏移方法,另一类是基于波动理论的叠前深度偏移方法。下面简述叠前深度偏移的几种主要方法,其他方法从略。

1) 射线法叠前深度偏移

(1) Kirchhoff 积分法叠前深度偏移

Kirchhoff 积分法叠前深度偏移能够适应变化的观测系统和起伏的地表,优化的射线追踪法和改进的有限差分法能够在速度场变化的情况下快速准确地计算绕射波和反射波旅行时,从而使积分法能够适应较复杂构造的地震成像。

(2) 高斯波束法叠前深度偏移

高斯波束偏移(GBM)是一种叠前 Kirchhoff 偏移和波动方程偏移的折中方法。它不但克服了传统积分法偏移精度不够的问题,而且可以对多次波至进行成像。高斯波束偏移保留了传统积分法偏移高效、灵活的优点以及对陡倾角地层和各向异性介质精确成像的能力。

2) 波动方程法叠前深度偏移

(1) F-X 域有限差分法叠前深度偏移

FXFD 算法以单程波方程作为波场延拓算子,同时又对单程波方程进行有理分式逼近,以提高方程的偏移倾角。由于采用的隐式差分格式是无条件稳定的,因此该算法不受频率及延拓步长的限制。

(2) SSF 法波动方程叠前深度偏移

该方法基于速度场分裂的思想,把整个速度场视为常速背景和变速扰动的叠加。在逐层波场延拓时,针对常速背景采用相移处理,即在频率-波数域实现,针对层内的变速扰动,在频率-空间域采用时移校正。

(3) Fourier 有限差分(FFD)法波动方程叠前深度偏移

该方法是在 SSF 偏移方法的基础上发展起来的。FFD 法偏移考虑了速度场的二阶扰动项,它在 SSF 算子的基础上,增加了关于二阶扰动处理的补偿项,该项是通过频率-空间域的有限差分计算得到的。

(4) 广义屏法波动方程叠前深度偏移

该方法认为速度场可分解为层内常速背景和层内变速扰动。对背景场相当于解常速的声波方程,可通过相移实现;对变速扰动,认为这种非均匀性相当于散射源(二次源)。一般假设波场延拓层厚度较小,在薄板近似条件下,对散射场计算式的积分核采用不同的近似方法得到不同的散射波场延拓式。

(5) 基于双平方根方程的叠前深度偏移

双平方根叠前深度偏移在炮点-检波点域或中点-半偏移距域(共中心点道集)中按照相应的传播算子进行波场延拓,得到“沉降观测”过程各深度层上的波场。其中炮点与接收点重合处延拓波场零时刻的瞬时响应反映了该点(附近)的波阻抗变化特征,因此采用零炮检距、零时间成像条件可以得到地下的构造图像。

(6) 基于波动方程的真振幅偏移

目前普遍使用的波动方程偏移方法,主要是针对相位进行波场延拓,保证了相位的正确性,不进行振幅处理,只具有相对振幅保持功能。真振幅偏移就是对几何扩散造成的振幅能量损失、入射角变化对反射系数的影响等进行补偿。

(7) 逆时叠前深度偏移

基于全声波方程的 RTM 把地面记录波场作为输入源,通过时间域反向外推来求解全声波方程。RTM 是波场传播的逆过程,是波动方程正演模拟的逆运算。RTM 方法完全遵循全波动方程,适用于任意复杂的速度模型,无倾角限制,可以成像回转波、多次波等各种体波。

1.3 地震叠前偏移技术及其展望

近年来,地震叠前偏移技术得到了快速的发展,并已成为高精度地震勘探数据处理的关键技术。目前地震叠前偏移技术的任务逐渐由勘探阶段向开发阶段过渡。就叠前偏移技术前景而言,随着大规模计算能力和工业界对地震成像精度要求的提高,各种与波场延拓有关的计算方法与技术将会不断得到发展,同时复杂介质的地震叠前偏移成像问题需要解决。比如非均匀介质、粘弹性介质、各向异性介质以及双相介质的叠前 RTM 成像等。另外复杂地表和复杂地质体双重复杂条件下的地震叠前偏移成像技术已成为发展的重点和热点,比如双复杂条件下的叠前 RTM。

从地震叠前偏移技术实用性角度来看,下述叠前偏移技术是需要得到进一步发展和值得关注的。

1.3.1 单程波叠前偏移

尽管双程波叠前 RTM 有很好的发展前景,但较单程波叠前偏移而言,双程波叠前 RTM 不仅会产生与一次反射信号相关的噪声,而且对速度场有更强的敏感性和依赖性,因此单程波叠前偏移不会完全被双程波叠前 RTM 所取代。就波场延拓方向而言,单程波叠前偏移具有与双程波叠前 RTM 相同的炮点波场正向延拓与检波点波场反向延拓的特点,这样单程波叠前偏移仍有很大的发展空间。目前单程波叠前 RTM 技术正在发展中。

对于单程波叠前偏移,近年来有学者提出了把复杂的倾斜坐标系用于单程波叠前偏移。这种方法对单次反向散射模型有良好的适应性,对陡倾角地层可以正确成像,同时又避免了 RTM 产生的内散射问题。总之从正反向波场延拓的观点来看,单程波叠前偏移仍有很好的发展前景。

1.3.2 弹性波叠前偏移

近年来,随着多波多分量地震勘探的不断深入和发展,人们对弹性波叠前偏移理论与技术给予了极大的重视与关注。尤其是弹性波叠前 RTM,由于能够对多波数据进行真振幅成像,获取多个独立的弹性波运动学和动力学属性,并有可能使成像结果为弹性波振幅随炮检距变化规律(AVO)分析和弹性波叠前反演所利用,因此弹性波叠前 RTM 是目前主要发展的地震叠前偏移成像技术。

1.3.3 多次波成像

多次波是指在地下经过多次反射后在检波点接收到的地震波,同样蕴含了地层结构