

深水油气地震勘探  
研究与实践丛书

# 深水油气地震成像 研究与实践

常 旭 王一博 编著



科学出版社

深水油气地震勘探研究与实践丛书

# 深水油气地震成像研究与实践

常 旭 王一博 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

深水油气地震勘探具有与陆地和浅海不同的成像问题,如深水盆地陆坡带海底地形的剧烈变化,深水盆地礁体、海山等特殊构造现象,深水水体非均匀性等对下覆地层的成像精度造成极大的影响。本书在科技部 973 项目的支持下,总结了项目组多年的研究成果,这些成果不仅对推动提高地震成像精度的研究有重要意义,而且对解决深水区复杂的地震成像实际问题有良好的借鉴意义,可推动我国深水油气地震勘探技术的提高。本书基于深水油气地震勘探的特殊问题,较系统论述地震成像的基本方法及其在深水海域的技术难点及相应的方法技术对策,给出深水海域地震成像的实例。

本书可供地球物理研究领域的科学家、大专院校教师、石油工业地球物理勘探领域工程师以及攻读博士学位的研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

深水油气地震成像研究与实践/常旭,王一博编著. —北京:科学出版社, 2014. 3

(深水油气地震勘探研究与实践丛书/朱伟林主编)

ISBN 978-7-03-040185-4

I. ①深… II. ①常…②王… III. ①油气勘探-地震勘探 IV. ①P618. 130. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 048389 号

责任编辑:周 丹 罗 吉 / 责任校对:郭瑞芝  
责任印制:肖 兴 / 封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 11 月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:232 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

深水油气地震勘探研究与实践丛书  
编委会名单

主 编 朱伟林

编 委 (以姓氏汉语拼音为序)

常 旭 金德刚 李绪宣 刘伊克

孙启良 王大伟 王建花 王一博

吴时国 谢宋雷 姚根顺

## 丛 书 序

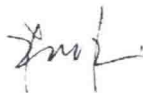
随着我国经济的持续高速发展,能源供应日趋紧张。根据国际能源组织发布的资料,近10年来世界上油气资源的新探明储量大部分来自海洋,尤其是深水区。据最新一轮全国油气资源评价,南海油气资源量为230亿~300亿吨,约占全国总资源量的1/3,但大部分蕴藏在深水区。一方面,与世界大西洋两侧典型被动大陆边缘深水盆地相比,南海深水盆地发育在边缘海边缘,其成盆机制、盆地演化及其油气地质条件存在显著差异,进一步增加了勘探的风险;另一方面,南海深水区发育崎岖海底、陡陆坡、海底火山等复杂地震地质条件,地震资料品质相对较差,严重影响了深水油气资源评价和勘探研究。因此,迫切需要开展与深水油气资源相关的地质和地球物理基础科学问题的研究,研发具有自主知识产权的深水区油气勘探的理论、方法和技术。

973计划“南海深水盆地油气资源形成与分布基础性研究”项目针对制约深水油气资源勘探的科学技术瓶颈及其基础科学问题,以我国南海北部深水盆地为靶区,利用地球物理、地球化学和石油地质学科相结合的手段,研究南海深水盆地的形成演化和石油地质特征,研究深水地球物理方法的基础性和前沿性问题,旨在建立适合南海深水区的地震采集设计方案、地震成像理论、地震多次波压制及油藏地震响应模式;阐明南海北部深水盆地的成盆机制和演化;分析深水盆地烃源条件和生烃机理;研究远源沉积条件下沉积体系特征及储层特征;揭示深水盆地大中型油气成藏规律,预测深水盆地大中型油气田分布;为我国深水油气资源的勘探开发提供前瞻性科学方法和技术。

经过5年的产学研协同攻关,项目创建了南海北部深水区复杂地质结构地震勘探基础理论和方法,首次全面揭示了南海北部深水盆地油气地质条件和油气成藏特征,在烃源和储层两个最核心的科学问题上取得重要进展,填补了我国深水油气成藏研究的空白。并通过理论和实践的紧密结合,研究成果直接应用,指导了我国深水油气勘探,获得了一系列商业性油气发现,推动了我国深水勘探的进程。

本系列丛书主要总结该项目与地球物理理论方法相关的研究成果。丛书共4册,分别是:《南海深水区地震采集技术研究与实践》《深水油气地震成像研究与实践》《南海深水多次波压制理论与实践》《南海深水沉积与储层的地球物理识别》。希望能对从事石油天然气地质和地球物理工作者以及相关专业研究人员具有参考价值。

973项目首席科学家



2013年11月



## 前 言

深水海域油气资源的勘探面临与陆地和浅海地区不同的前沿科学技术难题,无论是区域构造格局、盆地演化、油气生成、运移和储存,还是深水海域地球物理资料的采集、地震资料的成像,以及油气藏的评价等诸多方面都存在着基础研究的难点。深水油气地震成像是深水海域油气资源勘探领域的重要研究方向之一。近年来,我国南海深水区油气资源得到证实。但是南海深水区海底地形、盆地及含油气构造极其复杂,反射地震成像方法遇到了新的挑战。南海深水海域海底地貌的崎岖性、地质结构的复杂性、储层形态的多样性,以及水体动力环境的不稳定性等多个因素,加剧了地震波传播的复杂性,增大了地震波场有效信息提取的难度。在南海深水区各种观测数据明显不足的情况下,如何从地震资料求解未知的地质问题构成了地震成像研究的重点。

本书主要内容包括深水油气地震成像的新问题;深水复杂介质叠前时间偏移及深度偏移方法的原理和优缺点;基于射线理论的地震叠前深度偏移成像方法;基于波动理论的地震叠前深度偏移成像方法;深水海域地震资料偏移成像的实践;地震偏移速度建模的方法与实践;深水海洋动力环境对地震成像影响的分析。本书分7章讲述地震偏移成像的理论和方法,同时提供在深水海域地震成像的实践。

第1章主要根据我们的认识和体会,分析深水油气国内外研究现状,提出深水油气地震成像必须关注的特殊问题,是后续章节编写的前提。

第2章主要介绍叠前时间偏移成像的方法原理以及利用该方法在深水油气地震成像中的实践。时间偏移成像是各类偏移成像方法的起源,鉴于该方法计算速度快,对速度模型的精度要求不高,因此成为生产实践中的常用方法。这一章还介绍克希霍夫叠前时间偏移的原理、积分方程的求解,同时分析叠前时间偏移方法的局限性。

第3章的主要内容是基于射线理论的速度域偏移成像方法。这一章论述克希霍夫叠前速度域偏移原理和算法的建立,介绍高斯束偏移理论和算法,高斯束与克希霍夫方法同样属于射线类成像方法,但高斯束利用了更宽频带的信息,可在更大的程度上提高成像精度。在这一章中提供了利用克希霍夫叠前速度域偏移,以及高斯束偏移在深水区的实践。

第4章介绍基于波动理论的叠前速度域偏移方法,介绍双程波波动方程计算地震波场的原理和算法,在此基础上介绍双程波波动方程逆时偏移的原理和算法,给出作者在研究工作中对逆时偏移算法所做的改进,以及利用波动理论实施的深水海域地震偏移成像实例。

第5章介绍多尺度波形反演方法实现偏移速度建模的理论和方法,介绍频率域和时间域两类多尺度反演方法,以及多尺度波形反演与走时方法结合应用的优点,给出作者在波形反演研究中实施多尺度波形反演速度建模的实例。

第6章提出一次反射波与多次反射波同时成像的方法,该方法可在相当大的程度上提高地震波的照明范围。作者提出的一次波与多次波同时成像的理论依据和算法方程,

不需要增加任何计算量即可实现多次波的利用。同时还给出基于一次波与多次波同时成像的数值结果和在深水海域实际资料的处理结果,希望能与感兴趣的同行共同开展这项研究。

第7章主要论述深水动力环境变化对地震成像的影响,分析中尺度海洋现象可以构成对地震响应改变的物理机制,通过数值计算分析纵向温盐变化和中尺度暖涡的存在对成像精度的影响,同时为依靠地震波形变化实施的深水油气储层反演的研究提供依据。

本书在编写过程中兼顾学术研究的系统性和深水油气勘探实践的特殊性,用一定篇幅介绍了地震偏移成像的基础知识,力求理论与实际结合,读者可根据需要做选择性阅读。作者衷心希望本书能为关注地震偏移成像研究的科研同行提供参考。

# 目 录

丛书序

前言

<b>第 1 章 深水油气地震成像的新问题</b> .....	1
1.1 深水油气研究的意义 .....	1
1.2 国内外深水油气研究现状 .....	1
1.3 深水油气地震成像研究的新问题 .....	3
<b>第 2 章 叠前时间偏移成像</b> .....	4
2.1 叠前时间偏移的方法原理 .....	4
2.1.1 叠前时间偏移基本原理和算法 .....	4
2.1.2 叠前时间偏移在深水油气地震成像方法中的局限性 .....	9
2.2 叠前时间偏移在深水油气地震成像中的应用 .....	9
2.2.1 叠前时间偏移数值计算与成像实例 .....	10
2.2.2 叠前时间偏移在深水海域的应用实例 .....	21
2.2.3 叠前时间偏移的应用前景分析 .....	26
<b>第 3 章 基于射线理论的叠前深度域偏移成像</b> .....	30
3.1 克希霍夫积分方程偏移理论与深水海域地震成像实践 .....	30
3.1.1 克希霍夫积分方程偏移理论及算法的建立 .....	30
3.1.2 克希霍夫叠前深度域偏移在深水海域的应用实例 .....	32
3.2 高斯束偏移理论与深水海域地震成像实践 .....	34
3.2.1 高斯束偏移理论的建立 .....	34
3.2.2 高斯束偏移算法的建立 .....	41
3.2.3 高斯束叠前深度域偏移在深水海域的应用实例 .....	46
<b>第 4 章 基于波动理论的叠前深度域偏移成像</b> .....	49
4.1 波动方程正演数值计算 .....	49
4.1.1 黏弹性介质基本原理 .....	50
4.1.2 黏弹性介质构建方法 .....	51
4.1.3 黏弹性介质波动方程的简化方程 .....	52
4.1.4 黏弹性介质地震波场正演数值模拟 .....	54



4.2	双程波波动方程偏移原理与算法	65
4.2.1	Clairbout 的波动方程偏移成像原理	65
4.2.2	双程波波动方程逆时偏移成像原理	66
4.2.3	双程波波动方程有限差分交错网格解	67
4.2.4	双程波波动方程偏移难点与算法改进	69
4.3	双程波波动方程偏移在深水海域的实践	72
4.3.1	双程波波动方程逆时偏移数值计算	72
4.3.2	深水海域双程波逆时偏移实例	77
<b>第 5 章</b>	<b>多尺度波形反演与深度域地震波速度建模</b>	<b>80</b>
5.1	波形反演的理论基础	80
5.1.1	深度域速度建模的需求	80
5.1.2	波形反演速度建模方法原理	80
5.1.3	波形反演速度建模发展前景	81
5.2	多尺度频率域波形反演速度建模	81
5.2.1	地震波的频率域表示	81
5.2.2	频率域波形反演算法	82
5.2.3	多尺度频率域波形反演算法	85
5.2.4	多尺度频率域波形反演数值算例	89
5.3	多尺度时间域波形反演速度建模	94
5.3.1	多尺度时间域波形反演算法	94
5.3.2	多尺度时间域波形反演数值算例	97
5.4	频率依赖波动方程旅行时速度建模	101
5.4.1	波动方程旅行时速度建模方法原理	101
5.4.2	频率依赖波动方程旅行时速度建模原理	102
5.4.3	频率依赖波动方程旅行时速度建模数值算例	103
5.4.4	频率依赖波动方程旅行时速度建模发展前景	105
5.5	波动方程旅行时和波形联合快速反演速度建模	105
5.5.1	波动方程旅行时和波形联合速度建模方法原理	106
5.5.2	传统波动方程旅行时和波形联合速度建模方法实现	106
5.5.3	改进的波动方程旅行时和波形联合速度建模方法	109
5.5.4	改进的波动方程旅行时和波形联合速度建模方法数值算例	111
<b>第 6 章</b>	<b>一次反射波与多次反射波的同步偏移成像</b>	<b>114</b>
6.1	多次波在地震成像中的作用	114

6.2 基于波动理论偏移算法的多次波与一次波联合成像 .....	114
6.2.1 双程波算法的多次波与一次波联合成像原理 .....	115
6.2.2 双程波算法的多次波与一次波联合成像数值计算 .....	118
<b>第7章 深水动力环境变化下的叠前深度域地震成像</b> .....	<b>125</b>
7.1 影响深水地震波传播的海洋动力环境因素 .....	125
7.1.1 海洋动力环境的中尺度现象 .....	126
7.1.2 海洋动力环境变化影响地震波传播的物理机制 .....	126
7.2 深水海域非均匀水体地震波速度模型的建立 .....	126
7.2.1 海水温盐变化的声波速度建模 .....	127
7.2.2 中尺度涡旋的声波速度建模 .....	128
7.3 不同海洋动力环境因素影响下的地震偏移成像 .....	128
7.3.1 海水温盐变化与地震偏移成像 .....	129
7.3.2 中尺度涡旋与地震偏移成像 .....	133
7.4 小结 .....	137
<b>参考文献</b> .....	<b>138</b>
<b>后记</b> .....	<b>144</b>

# 第 1 章 深水油气地震成像的新问题

## 1.1 深水油气研究的意义

近年来,海上深水区发现的油气资源储量正在快速增长,深水油气钻探的水深已经超过 3000m。随着深水油气勘探成功率增加,国际相关机构陆续制定了关于深水油气勘探理论和技术的研究规划,争相挑战深水油气勘探的极限。例如,美国联邦政府和石油公司联合制定的深海技术开发研究计划(DEEPSRAR),将 100~500m 水深的深海油田相关技术作为主要研究内容;巴西制定了为期 15 年分三个阶段实施的技术发展规划,目标是形成 3000m 水深的海洋油气田开发技术能力。全球的海洋油气勘探表明,深水区具有更大的沉积空间,以及沉积堆积和促使油气成熟的热源,也具有形成更大的油气藏的潜力(Anderson et al., 2000; Deluca, 1999; Pettingill, Weimer, 2002a, 2002b)。

长期以来,我国海洋油气勘探开发集中在陆架和浅水陆坡区,陆续发现了一大批浅水油气田。我国南海大于 300m 水深的海域面积超过了 200 万平方公里,周边的文莱、马来西亚、菲律宾等国在南海南部海区相继发现了规模可观的油气资源(吴时国,袁圣强, 2005)。自 2005 年以来,周边国家在南海南部的油气产量已经超过 5000 万吨/年,2006 年中国海洋石油总公司在珠江口白云凹陷的深水探井(荔湾 3-1-1,水深 1480m)获得 1000 亿立方米资源量的发现,证实了南海深水区的巨大油气资源潜力,南海深水区将成为我国海洋油气的重要基地之一。

面对南海深水海域的油气资源勘探,现有的科学技术水平明显不足,导致我国深水油气的研究明显滞后于国际水平。关于南海深水海域油气资源的勘探开发和评价,无论是在石油地质还是在勘探地球物理研究方面都面临与陆地和浅海地区不同的科学问题,迫切需要开展相关的研究工作。由于缺少钻井及可见的地质资料,勘探地震学方法及手段在深水海域油气资源勘探研究中占有重要地位(Huffman, 2001; Filpo, 1999; Schneider, 2000),地震方法是获取南海超大水深地区地质构造以及盆地结构的有效手段。但是南海特有的海水物理参数和海洋动力环境、崎岖复杂的海底地貌、大水深长周期多次反射波的发育、横向强烈的非均匀结构,对反射地震成像的方法原理提出了挑战,地震成像的困难成为制约南海油气资源调查评价的瓶颈。本书主要讨论深水油气勘探研究中的地震成像问题,力求突破理论方法屏障,为开发我国南海深水区油气资源提供可靠的基础数据。

## 1.2 国内外深水油气研究现状

目前陆地和浅海地区油气剩余可采资源越来越少,而深水海域蕴藏着丰富的油气资



源。近年来在巴西坎波斯盆地、墨西哥湾、西非的深水海域不断发现大型油气田(Deluca, 1999; Khain, Polakova, 2004; Pettingill, Weimer, 2002a, 2002b), 深水海域油气资源越来越多地受到各国政府和石油公司的关注。由于深水盆地与浅海大陆架盆地在构造几何形态、动力学形成机制、烃源岩分布规律及地球物理特征方面存在很大的差别, 与深水油气相关的研究工作在学术界引起了广泛的关注(Talyor, Hayes, 1983; Briais et al., 1993; Akinosho, 1999)。

在深水地球物理研究方面, 高精度的地震成像仍然是各类方法技术围绕的核心和聚焦点。

(1) 近年来海底电缆多分量地震方法作为深海地震观测的重要方式得到长足发展, 随着海底电缆观测成本的进一步降低, 多分量地震将成为未来深水油气地震方法的重要手段。同时, 与多分量地震密切相关的深水转换波成像的研究也必然是未来发展的一个重点(Stephens, 1996)。

(2) 我国南海深水盆地水深超过千米, 新生代沉积厚度上万米, 长偏移距地震观测将成为一种必要的手段。但是长偏移距地震观测除了遇到电缆漂移的技术问题之外, 传统意义上地震波传播的时距方程也表现出严重的缺陷。近年来, 地震波时距方程六阶展开最优化法的提出, 不仅使长偏移距地震波形叠加后畸变问题的研究深入开展, 还对长偏移距引起的地震波速度各向异性问题探讨了解决方案(尤建军等, 2006; Alkhalifah, 1995), 长偏移距地震波时距关系的解决将对深水地震成像提供有利的技术支撑。

(3) 压制多次反射波是深水区地震成像成功的关键, 现有的拉东变换等方法主要利用多次波与反射波速度的差异, 不适合深水区强能量长周期地震多次波的消除。最近几年发展的 SRME 方法(Berkhout, Verschuur, 1997)、波路径方法(刘伊克等, 2008)、逆散射方法是消除多次波最有希望的方法, 深入的研究工作使此类方法正在从理论向实用化发展(Filpo, 1999; 金德刚等, 2008)。可以预测, 消除多次波方法研究的进展对提高地震成像的精度一定会产生重要的推动作用。

(4) 南海特有的海水物理参量(温度和盐度)和海洋动力环境特征(风浪、海流、内波)对地震波传播的影响近年来受到极大的关注(Keen, Allen, 2000), 美国和欧洲太空局以及中国科学院都在南海海域观测到孤立内波(Munroe, Lamb, 2005), 海洋的物理现象对地震波场的畸变作用及其对地震成像精度的影响将成为地震方法中不可忽视的一点。

(5) 南海深水地震成像面临的问题十分复杂, 主要因素包括海底地貌的复杂性、沉积结构的复杂性、储层形态的多变性, 以及超大深度水体动力环境的不稳定性等, 这些因素加剧了地震波传播的复杂性, 增大了从复杂的地震波场对有效波成像的难度。深水复杂构造背景下二维地震方法的缺陷加深了地震成像与反演的难点(Lee, 1999), 在南海各种观测数据明显不足的最佳地求解未知的地质问题构成了成像研究的重点。近年来, 波动方程叠前深度域保幅偏移方法(张宇, 2006; 常旭等, 2008), 研究了深水崎岖海底造成的地震波散射和横向速度的剧烈变化, 提高了成像效果, 推动了深水地震成像研究的进展。

### 1.3 深水油气地震成像研究的新问题

问题 1: 如何认识复杂海底地貌情况下地震波的速度场?

深水油气地震成像首先必须解决复杂海底地貌情况下地震波速度场的建立问题, 这一问题的解决对提高波动方程叠前深度偏移的精度至关重要, 是波动方程叠前深度偏移方法体系中的关键问题。目前工业界一般利用偏移速度分析的方法建立速度模型, 近年来快速发展的全波形反演方法, 可以更精细地建立深度域速度模型, 但如何提取地震数据中的低频信息以保证初始速度模型的客观性, 仍然是一个需要研究的新问题。

问题 2: 如何在偏移成像方法中合理补偿深层能量?

我国南海深水区崎岖海底引起地震波散射, 超大水深引起中深层能量强烈衰减, 如何确立有效的偏移算法, 使深水海域中深层地震波能量得到恢复, 是地震成像研究遇到的新问题。近年来, 叠前深度域保持振幅偏移方法的研究可为解决这一问题提供理论基础。但是, 在实际资料成像处理的过程中, 叠前深度域保持振幅偏移方法还有很多技术问题需要解决。

问题 3: 如何认识南海超大水深引起的超强多次反射波?

在深水油气地震成像研究中, 必须解决多次波模型的建立问题, 特别是长周期的、与表面相关的多次波模型的建立, 是有效消除多次波的关键, 同时也是突出深层能量, 加强反射波传播效率的关键。这一问题的解决将直接影响成像质量。近年来, 多次波利用的研究得到发展, 多次波的利用可以扩大地震波的照明范围, 使复杂构造的照明得到补偿。因此, 在深水油气地震成像研究中多次波不仅仅需要消除, 还需要研究对其的有效利用。

问题 4: 海水物理参数以及海洋动力环境是否对偏移精度造成影响?

海洋的动力环境变化和海水物理性质的差异使水层具有非均匀性特征, 导致声波速度结构发生变化。长期以来, 海上油气地震勘探对地震响应和地震成像的研究一般忽略海水层的非均匀性。这在水深 0~50m 的浅海陆架海域是可行的, 但是, 当水层深度超过 1000m 甚至到 3000m 时, 水层非均匀性的影响还可忽略吗? 面对上千米深水地震数据的成像, 这一问题应该得到研究。

综上所述, 深水油气地震成像研究必须针对深水区特有的问题开展研究, 以满足深水油气勘探开发日益增长的重大需求。



## 第 2 章 叠前时间偏移成像

地震偏移成像根据其在叠前或叠后实现的不同区分为叠前偏移和叠后偏移,又根据其 在时间域或深度域实现的不同区分为时间偏移和深度偏移。根据这两大类区分,地震 偏移方法可组合为叠加后时间偏移和叠加后深度偏移,叠前时间偏移和叠前深度偏移。 叠后偏移数据量大大减少,但受到数据叠加的影响,损失了地震波形的精细变化,成像精 度低于叠前偏移方法。随着计算机硬件技术的不断发展和大规模数据处理能力的不断提 高,地震叠前偏移方法已经成为工业界采用的主流方法。叠前时间偏移具有观测系统适 应性强、速度分析快捷、运算效率高、资料成像较清晰等特点,至今仍然是地震偏移成像 处理不可或缺的方法。本章主要介绍地震叠前时间偏移的原理和算法以及相关参数的 选择。

### 2.1 叠前时间偏移的方法原理

叠前时间偏移与叠后时间偏移和叠前深度偏移一样,既有基于射线走时类的克希霍 夫积分方法,也有基于波动方程的有限差分方法和傅里叶变换法。从原理和适用性上分 析,叠后时间偏移是基于地震观测系统自激自收方式,不能对倾斜地层精确成像;而叠前 时间偏移是基于绕射叠加或 Claerbout(1972)的反射波成像原则,能够解决叠后时间偏移 存在的问题,适于横向速度中等变化的介质,对偏移速度场不是很敏感,具有较好的构造 成像效果,能满足大多数探区对地震资料的精度要求。所以,叠前时间偏移相对于叠后时 间偏移有其独特的优势,是目前地震资料处理中非常重要的方法。本节将以克希霍夫积 分法为例详述叠前时间偏移的基本原理和算法。

#### 2.1.1 叠前时间偏移基本原理和算法

##### 1. 克希霍夫叠前时间偏移的基本原理

克希霍夫叠前时间偏移是一种绕射求和的偏移方法。它具有以下特点:①对速度模 型的要求不高,不需要高精度的速度模型即可得到较为精确的成像效果;②对野外采集数 据的适应性很好,能很好地处理各类采集数据;③计算效率较高,尤其在使用 MPI 并行的 情况下能够较大地提高效率。基于绕射求和原理的偏移方法是在输入空间 $(x, t)$ 上搜索 所有的能量,只要绕射源(惠更斯二次震源)存在,那么在输出空间 $(x, z)$ 中就能标出它的 确切位置。对 $(x, z)$ 空间中的每一点,在相应的 $(x, z)$ 空间中沿着它的惠更斯二次震源绕 射曲线轨迹进行搜索,把搜索到的各点振幅加起来,然后放到 $(x, z)$ 空间中的这个点上。 也就是说,绕射求和就是沿着双曲线轨迹,直接作振幅叠加,这里的叠加双曲线(即求和轨

迹)是受速度函数控制的。假设速度-深度模型为水平层状介质,则速度函数即为双曲线顶点的均方根速度。这里的 $(x, z)$ 是对于深度偏移而言的,在时间偏移前后,就像剖面中所见那样,振幅的和值实际上被放在 $(x, t)$ 空间中了,这里的 $t$ 是偏移后该点所在位置的时间。在进行绕射求和之前,必须考虑如下三个因素。

(1) 振幅随角度变化的倾斜因子或方向因子。它表示为传播方向与垂直轴 $Z$ 之间夹角的余弦。

(2) 球面扩散因子。它在二维波动空间中用 $\sqrt{\frac{1}{vr}}$ 表示,在三维波动空间中用 $\frac{1}{vr}$ 表示(这里 $v$ 表示偏移速度, $r$ 表示炮点到成像点的距离)。

(3) 子波整形因子。对二维偏移,设计一个 $45^\circ$ 常相位谱,振幅谱正比于频率平方根;对三维偏移,这个因子的相移为 $90^\circ$ ,振幅谱与频率成正比。

克希霍夫偏移的实用方法有两种:一个为输出道观点,另一个为输入道观点,如图 2.1.1 和图 2.1.2(Yilmaz, 2001)所示。

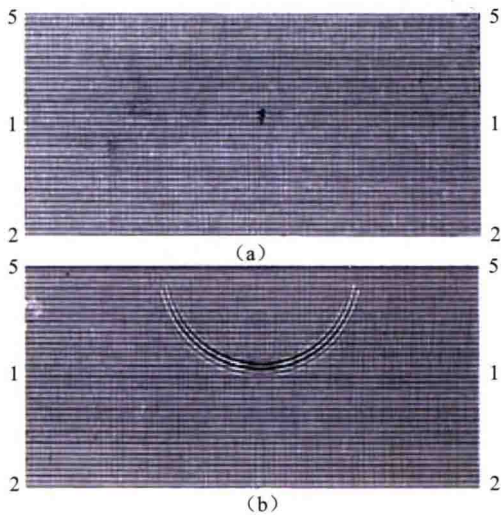


图 2.1.1 输出道观点(Yilmaz, 2001)

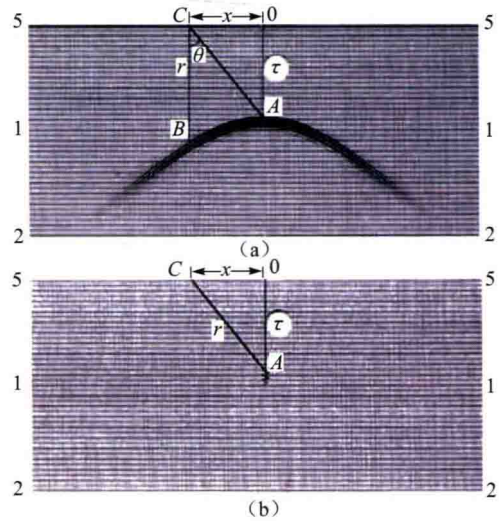


图 2.1.2 输入道观点(Yilmaz, 2001)

所谓输出道观点就是把零偏移距剖面或者非零偏移距剖面上的脉冲输出到成像空间中,等时面对应的可能的地下反射点上,反射同相轴上任意点都可以看成是一个脉冲,把脉冲响应能量扩散到一系列等时面上,所有等时面对应的可能的反射面的包络构成地下反射界面。

输入道观点是地下界面上的每一点都可以认为是一个绕射点,它们在入射波的激励下产生广义绕射,地下的一个绕射点对应到记录上就是一条绕射双曲线。对于每个绕射点,计算绕射时距曲线,按此关系把时距曲线的能量叠加到绕射顶点上,绕射顶点的连线就是真正的反射界面。

## 2. 克希霍夫叠前时间偏移的具体算法

标量波动方程的克希霍夫积分分解:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2(x, y, z)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] P(x, y, z; t) = 0 \quad (2.1.1)$$

是惠更斯原理的数学表述。在方程(2.1.1)中,  $P(x, y, z; t)$  为在介质中以速度  $v(x, y, z)$  传播的压力波场。惠更斯原理表述如下: 在时间  $t + \Delta t$  时的压力扰动是点震源在时间  $t$  时产生的球面波的叠加。

分析图 2.1.3 中在位置  $S(x, y, z)$  处的点绕射源的几何形态, 以及在绕射源激发产生的绕射波场在表面区域  $A$  的观察结果。实际上, 表面区域  $A$  只是闭合面的一部分, 是闭合面上的观察窗口。为了方便, 我们将观察表面区域  $A$  上的检波点位置  $R(0, 0, 0)$  定为坐标系原点。

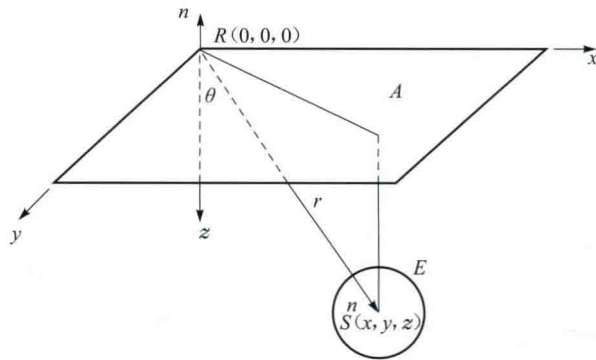


图 2.1.3 从标量波动方程的克希霍夫积分解得到的点绕射(陶杰, 2011)

为了计算方便, 将在时间方向上对波场应用傅里叶变换:

$$P(x, y, z; \omega) = \int P(x, y, z; t) \exp(-i\omega t) dt \quad (2.1.2)$$

式中,  $\omega$  为角频率。逆变换给出如下:

$$P(x, y, z; \omega) = \int P(x, y, z; t) \exp(i\omega t) dt \quad (2.1.3)$$

在时间方向对方程(2.1.1)应用傅里叶变换, 得到

$$\left( \nabla^2 + \frac{\omega^2}{v^2} \right) P(x, y, z; \omega) = 0 \quad (2.1.4)$$

式中,  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子:

$$\nabla^2 P = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) P \quad (2.1.5)$$

我们可以直观地表述在闭合面  $A$  上的观察结果是震源  $S$  产生的。这种说法的数学表述是高斯散度定理:

$$\int_V \nabla^2 P dV = \int_A \frac{\partial P}{\partial n} dA \quad (2.1.6)$$

式中,  $V$  为面  $A$  所包围的区域的体积; 导数  $\partial P / \partial n$  为面  $A$  的外法线方向。注意方



程(2.1.6)所表述的高斯散度定理将面积分转换为体积分。

对于每一个频率成分  $\omega$ , 解方程(2.1.5), 在所有的频率成分上, 求各解之和, 来计算在震源  $P(x, y, z; t=0)$  处的波场。

从克希霍夫(1891)得到的解要求格林函数, 格林函数描述了从点震源向外传播的波有球面对称性:

$$G(r, \omega) = \frac{1}{r} \exp\left(-i \frac{\omega}{v} r\right) \quad (2.1.7)$$

式中,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.1.8)$$

是观测点和震源位置之间的距离。

方程(2.1.7)给出的格林函数也是方程(2.1.6)的一个有效解:

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{v^2}\right)G(x, y, z) = 0 \quad (2.1.9)$$

将方程(2.1.4)的两边同乘格林函数方程(2.1.7)中的  $G$ , 得到

$$\int_V G \nabla^2 P dV = \int_A G \frac{\partial P}{\partial n} dA \quad (2.1.10)$$

互换方程(2.1.10)中的波函数  $P$  与格林函数  $G$ , 得到

$$\int_V P \nabla^2 G dV = \int_A P \frac{\partial G}{\partial n} dA \quad (2.1.11)$$

现在用方程(2.1.10)减方程(2.1.11), 得到

$$\int_V (G \nabla^2 P - P \nabla^2 G) dV = \int_A \left(G \frac{\partial P}{\partial n} - P \frac{\partial G}{\partial n}\right) dA \quad (2.1.12)$$

方程(2.1.12)就是格林定理。

将方程(2.1.4)和(2.1.9)代入方程(2.1.12)的左边:

$$\int_V (G \nabla^2 P - P \nabla^2 G) dV = \int_V \left(-G \frac{\omega^2}{v^2} P + P \frac{\omega^2}{v^2} G\right) dV \quad (2.1.13)$$

并因此注意:

$$\int_V (G \nabla^2 P - P \nabla^2 G) dV = 0 \quad (2.1.14)$$

现在将注意力放到方程(2.1.12)的右侧。因为方程(2.1.7)定义的格林函数在震源位置  $S$  变成无穷, 所以我们需要将震源放在一个无穷小的以面  $E$  包围的小球内。这就要计算方程(2.1.12)右边的两部分, 即一部分是对于面  $E$ , 另一部分是对于面  $A$ 。

将方程(2.1.7)代入方程(2.1.12)的右边, 并从图 2.1.3 中可看出, 得到对于面  $E$ ,

$$\left(\frac{\partial}{\partial n}\right) = -\left(\frac{\partial}{\partial r}\right):$$