

Theoretical Framework of Reflection Seismology

反射地震学理论纲要

杨文采 著



石油工业出版社

反射地震学理论纲要

Theoretical Framework of Reflection Seismology

杨文采 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在连续介质力学的基础上,系统地讲述了反射地震学的理论基础、反射地震资料处理中的波动方程,以及声波方程正反演问题的解法。正文分7章:波动理论入门、完全弹性固体中的弹性波、从弹性波到地震波、反射地震资料处理中的波动方程、波动方程初边值问题的积分解、反射地震波场的分解与延拓、地震勘探反演方法。前几章主要讨论均匀介质中的弹性波动方程,后两章和附录A重点讨论非均匀介质中声波方程的正反演。

此书可作为应用地球物理专业研究生教材,也可作为地震勘探研究人员提供理论进展方面的参考。

图书在版编目(CIP)数据

反射地震学理论纲要 / 杨文采著.

北京:石油工业出版社,2012.2

ISBN 978-7-5021-8783-5

I.反…

II.杨…

III.地震反射波法—研究

IV. P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第228599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

编辑部:(010) 64523533 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷

850×1168毫米 开本:1/32 印张:9

字数:228千字

定价:35.00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

前 言

作为应用地球物理学一个分支的反射地震学，有没有自身的理论体系？这是笔者一直在思索的问题。如果反射地震学理论只是照抄弹性力学或连续介质物理学的公式，而不是针对应用目标去发展自身特有的理论，那么反射地震便只是一门应用技术，而不是一门应用科学。直至今日，许多人仍然把应用地球物理学视为地球探测的工程技术，这不能怪他们无知，只能怪我们自己没有把反射地震学的理论体系研究完善。

诚然，反射地震一开始只是一门油气勘查的应用技术。1926年，在美国俄克拉荷马州根据反射地震探测发现了油田，这证明反射地震的确是一门有巨大经济价值的实用技术。此后，经过几十年的努力，尤其是在计算机发明之后，反射地震学的理论迅速发展，在20世纪70年代开始出现了反射地震学(reflection seismology)的多部专著。但是，由于地震勘探方法的更新速度太快，这些专著都不可能涵盖反射地震学理论发展的新内容，而大学的教材却大多停留在引用弹性力学公式的基础上，没有突现反射地震学自身的理论发展。30年来，笔者写过几本地球物理反演理论与方法方面的专著，深知反演的基础在正演，希望能够抽出时间把地震学正演理论系统分析整理一番，使正、反演理论融为一体，相得益彰。由于找不到一本基于连续介质力学总结反射地震学方程家族体系的教材或专著，于是萌生了自己来试写一本的想法，这个愿望终于在白发之年得以实现。

本书是作为应用地球物理专业研究生教材来编写的，不可能涵盖反射地震学理论发展的所有内容，只是以连续介质波动力学理论把反射地震学中的方程家族体系和应用条件尽量讲清

楚，这就是本书称为“纲要”的含义。笔者并不强调方程和数学公式的抽象之美，但本书的确是以方程和数学公式为骨架搭起来的体系，体现的是古典物理学的精神和价值观。在后现代的社会，仍然遵循古典物理学的精神和价值观，是不是唐吉珂德精神可笑的复活？笔者认为，方程和数学公式乃是人和计算机交流必需的通用语言，不见得要求地质学家通晓这种语言，但是不通晓这种语言一定不能称为地震学家。

作为讲义时本教材的授课时间约为 50 课时。写讲义好像给学生盖砖房，砖大多数是买来的，房子是否结实功力全在结构、地基、房柱和黏合剂上。作为讲义，切忌以下三种误导。第一是把讲义写成研究报告，大谈枝节，不见主干，误导学生陷入局域而又不见全局。第二是把讲义写成技术汇编，大谈不久就会被更新换代的实用技术，不深入探讨科学问题的理论根基，学生听得兴高采烈，以为能学到许多有用知识，但忽视了研究生应有的知识文明时代的学术涵养，尤其是从自然规律感悟到的普适的精髓。第三是把讲义写成百科全书，大抄有关专著及论文，面面俱到，不成体系。书写的又全又厚，显得知识渊博，学生也学到许多知识碎片，但上完课程就忘光，不利于培养研究生应用系统知识解决实际问题的思维能力。因此，这本书的写作原则是：只讨论主干，不讲枝节；只讨论理论，不讲已市场化的技术；不怕写少，只怕讲多，主干一定讲清讲透，枝节点到为止。不仅让学生了解一个个知识的碎片，还要向他们示范把一个个知识碎片串通起来解决问题的本领。

本书用前两章来引述反射地震学的物理学根基：第 1 章概述普通物理学中的波动理论；第 2 章概述连续介质力学中的波动理论。过去有的论著中引用质点动力学讲述地震波传播，笔者认为是不合适的，有关概念在文中尽量用连续介质力学予以纠正。第 3 章重点讲地震波与固体物理中的弹性波有何不同的传播特征。第 4 章讲地震资料处理流程中所代表的波动方程及相关边界条件，是如何转换的。第 5 章讨论波动方程的积分解

与格林函数法；第6章讨论地震波场分解与延拓问题，强调了变系数波动算子的特点与展开的方法，并在本章最后完成了反射地震学方程家族体系的定量表述。第7章扼要介绍地震勘探反问题及其求解范例。

古今中外的名画，显露自然的色彩与形象之美，令人神往（参见附录B）。数学家导出的公式，显露自然抽象之美，令人感到神妙莫测。本书正文没有图画，罗列了三百余条有关波动的方程，是使你欣赏，还是使你厌烦呢？笔者以为，公式是一种极端抽象的图画，工科研究生不一定要去创作这种图画，但要懂得欣赏这种抽象图画之美。授课就是讲解抽象派图画的整体造型与局部细节美在何处。如果把公式推导讲得像图画欣赏那样有味道，便体现了教授的水准。笔者希望有一天能修炼到这个境界。

目 录

1	波动理论入门	1
1.1	波动与连续介质	1
1.2	振动	5
1.3	传播与扩散	7
1.4	声波方程	9
1.5	复系数声波方程	13
1.6	变密度或变波速声波方程	18
1.7	小结	21
2	完全弹性固体中的弹性波	22
2.1	弹性应力张量和应变张量	22
2.2	完全弹性介质中的矢量波动方程	26
2.3	完全弹性介质中的标量波动方程	30
2.4	二维介质中的弹性波	34
2.5	非各向同性介质中的弹性波	35
2.6	弹性波动方程的边界条件	38
2.7	岩石的弹性波传播速度	40
3	从弹性波到地震波	52
3.1	关于变系数声波方程的正演问题	52
3.2	地震记录与波传播方程	58
3.3	多个水平层介质中弹性波的传播	63
3.4	多相介质中弹性波的传播理论 I: Gassmann 模型	72
3.5	多相介质中弹性波的传播理论 II: Biot 理论	77
3.6	用 Gassmann 模型追踪油气储层	84
4	反射地震资料处理中的波动方程	89
4.1	陆地地震记录的静校正处理	89

4.2	切除与去鬼影滤波处理	92
4.3	去除旋转波场耦合的地震资料处理	94
4.4	去除海底多次波耦合的地震资料处理	95
4.5	共中点道集数据的叠加	97
4.6	单程波方程与地震偏移声波方程	101
4.7	反射体	105
4.8	小结	110
5	波动方程初边值问题的积分解	111
5.1	混合边值柯西问题的积分解	112
5.2	波动方程初边值问题的 Kirchhoff 积分公式	115
5.3	声波方程初边值问题的格林函数	120
5.4	波速线性变化介质的格林函数	127
5.5	程函方程与输运方程	131
5.6	非齐次边界条件下的第二类格林函数	135
5.7	小结	137
6	反射地震波场的分解与延拓	138
6.1	声波场的上、下行波方程	139
6.2	叠前地震 Kirchhoff 偏移	142
6.3	均匀介质中反射地震波场的向下延拓	145
6.4	垂向非均匀介质中反射地震波场的向下延拓	149
6.5	拟微分算子与 Fourier 积分算子	153
6.6	非均匀介质中反射地震波场的向下延拓	163
6.7	反射地震波场的体波震相分解	167
6.8	小结	171
7	地震勘探反演方法	173
7.1	地震勘探反演概述	173
7.2	Born 近似逆散射反演	182
7.3	垂向非均匀背景介质下声波方程反问题	189
7.4	波速变化背景介质的逆散射反演	193
7.5	反射地震波场的非线性迭代反演	202

7.6	最大熵反演和储层参数反演	211
7.7	小结	218
附录 A	求解变密度声波方程反射地震波场的有限差分法	219
A.1	引言：反射地震学计算技能的基本训练	219
A.2	沉积盆地地层与构造的数学模型	221
A.3	有限差分法地震波场合成原理	225
A.4	有限差分法地震波场合成程序说明	231
A.5	有限差分法地震波场合成 Fortran 源程序	233
A.6	有限差分法地震波场合成程序使用说明	259
附录 B	封面与封底图画故事	264
	参考文献	267

Contents

Chapter 1 Introduction to the wave theory	1
1.1 Wave motion in continuous media	1
1.2 Vibration	5
1.3 Propagation and diffusion	7
1.4 Acoustic wave equation	9
1.5 Acoustic wave equation with complex coefficients	13
1.6 Acoustic wave equation with variant density or velocity	18
1.7 Summery	21
Chapter 2 Elastic waves in full-elastic solid	22
2.1 Stress tensor and strain tensor	22
2.2 Vector wave equation in fully elastic media	26
2.3 Scalar wave equations in fully elastic media	30
2.4 Elastic wave equation in 2D media	34
2.5 Elastic wave equations in anisotropy media	35
2.6 Boundary conditions for elastic wave equations	38
2.7 Elastic wave velocities of rocks	40
Chapter 3 From elastic waves to seismic waves	52
3.1 Forward problems with the variant coefficient equation	52
3.2 Seismic reflection records and correspondent equations	58
3.3 Wave propagation in horizontal multi-layered media ...	63
3.4 Elastic waves in a fluid-saturated solid I : Gassmann model	72
3.5 Elastic waves in a fluid-saturated solid I I: Biot's theoty	77

3.6 Oil/gas reservoir delineation with Gassmann models	84
Chapter 4 Wave equations along seismic data processing	89
4.1 Statics of land reflection records	89
4.2 Muting and de-ghost filtering	92
4.3 Reducing rotational waves	94
4.4 Reducing multiples	95
4.5 Stacks of common-midpoint gather data	97
4.6 One-way wave equation and seismic migration equation	101
4.7 The reflectors	105
4.8 Summery	110
Chapter 5 Integral solutions of wave equations and Green's functions	111
5.1 Integral solutions of Cauchy problem with mixed boundary conditions	112
5.2 Integral formula of wave problems and Kirchhoff integral	115
5.3 Green's functions for boundary problems of acoustic equation	120
5.4 Green's function for media of linear varied velocity	127
5.5 The eikonal equation and transport equations	131
5.6 The second-type Green's functions with non-zero boundary conditions	135
5.7 Summery	137
Chapter 6 Analysis and continuation of reflection seismic waves	138
6.1 Equations of upward and downward acoustic waves	139
6.2 Prestacks seismic Kirchhoff migration	142
6.3 Downward continuation of reflection wavefield in homo-geneous media	145

6.4 Downward continuation of wavefield in vertically inhomogeneous media	149
6.5 Pseudo-differential operators and Fourier integral operators	153
6.6 Downward continuation of wavefield in inhomogeneous media	163
6.7 Decomposition of body-wave phases in reflection seismic wavefield	167
6.8 Summery	171
Chapter 7 Methods for solving the inverse problems in reflection seismology.....	173
7.1 Introduction to inverse problems in seismology	173
7.2 Born approximation inversion by inverse scattering.....	182
7.3 Acoustic wavefield inversion in vertically inhomogeneous background media	189
7.4 Inversion in variant velocity background media by inverse scattering	193
7.5 Non-Linear iteration inversion for seismic reflection wavefield	202
7.6 Maximum entropy method and inversion of reservoir parameters	211
7.7 Summery	218
Appendix A The finite element method for solving acoustic wave equation with a basin model of variable density and velocity	219
A.1 Introduction of computational training in reflection seismology	219
A.2 A mathematical model for sedimentary basins.....	221
A.3 The finite element method for seismic modeling	225

A.4 Programming the finite element method for seismic modeling	231
A.5 Fortran programs for the seismic modeling	233
A.6 Instruction manual of the programs	259
Appendix B A story on the front and back cover pictures.....	264
References	267

1 波动理论入门

物理学研究物质的运动，起源于牛顿力学的理论。在 17 世纪牛顿创立的经典力学中，首先用质点动力学理论描述宏观物体的运动，用位于重心的同质量质点和质心代表宏观物体。但是，由于质点动力学理论有一定局限性，不完全适合于描述在连续介质中传播的波场，因此，在 20 世纪早期，朗道等科学家发展了连续介质力学。现今，流体力学、固体力学都是连续介质力学的分支。对于微观粒子运动规律的描述，20 世纪早期还发展了量子力学。本书的理论基础来自连续介质力学和数学物理方法。

宏观物体的运动大体上可分为 3 种类型。第一种为位移运动，如直线运动、旋转、飞行、流动等。第二种为振动和波动，如周期运动、水波、声波、光波、地震波等。第三种为混沌运动，如间歇运动、湍流、非线性波动等。本书只讨论经典的振动与波动理论。振动和波动是自然界物质运动的一种行为，对于与外界没有能量与信息交换的封闭系统，振动可以用常微分方程的初值问题表述；对于与外界有能量与信息交换的开放系统，波动要用偏微分方程的初边值问题表述。本章是对波动理论的入门，讨论的重点为声波方程及相关的波动行为。

1.1 波动与连续介质

波动指的是振动在连续介质中的传播。把概念公式化，有：

波动 = 振动 + (在连续介质中) 传播；

振动 = 物质围绕其平衡点作（原地）周期性运动；

传播 = 由运动引起的相邻介质之间的相互作用及其造成的振动能量在空间的扩散。

上述概念都是狭义的，即指波动过程中介质元振动的平衡点固定而不流动。对固体介质中传播的弹性波，上述定义才是准确的。广义的波动平衡点不固定而可以流动；例如，水波也是波动，但平衡点也在流动。

因此，连续介质力学研究的波动具有以下 3 个假设前提：

(1) 任何物质的运动都服从质量守恒定律，即其质量 M 对时间 t 的微分为零，即

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (1.1)$$

(2) 波动场中质点振动的平衡点固定而不流动。

(3) 振动发生在连续介质之中，因而相邻介质之间的相互作用服从相同的作用规律（即连续性方程）。于是，连续介质中的波动理论包含边界条件。

什么介质是连续介质？或者说，服从什么规律的介质定义为连续介质？

定义：在小变形时，满足以下连续性方程的介质称为连续介质，即

$$\rho = \rho_0(1 - \operatorname{div} \mathbf{u}) \quad (1.2)$$

式中： ρ 为任一时刻 t 时介质中任一体积元的密度； ρ_0 为初始时刻 t_0 时该体积元的密度； $\mathbf{u}$ 为该体积元的位移矢量； $\operatorname{div} \mathbf{u}$ 称为位移散度。(1.2) 式可以从质量守恒定律 (1.1) 式推导出来。体积元与密度的乘积称为物质元。

设 V 为连续介质占有的体积，则 (1.1) 式质量表为

$$M = \int_V \rho dV$$

在直角坐标系中，由质量守恒定律有

$$M = \int_V \rho dV = \int_V \rho_0 dV \quad (1.3)$$

式中：下角标 0 表示 t_0 时刻。由于 $dv=dx dy dz$ ， $dv_0=dx_0 dy_0 dz_0$ ，
如记行列式

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial x_0} & \frac{\partial x}{\partial y_0} & \frac{\partial x}{\partial z_0} \\ \frac{\partial y}{\partial x_0} & \frac{\partial y}{\partial y_0} & \frac{\partial y}{\partial z_0} \\ \frac{\partial z}{\partial x_0} & \frac{\partial z}{\partial y_0} & \frac{\partial z}{\partial z_0} \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

则 $dV = J dV_0$

代入 (1.3) 式中得

$$\int_{V_0} \rho J dV_0 = \int_{V_0} \rho_0 dV_0 \quad (1.5)$$

或

$$\int_{V_0} (\rho J - \rho_0) dV_0 = 0 \quad (1.6)$$

即被积函数为零

$$\rho_0 = \rho J \quad (1.7)$$

假设运动小形变，即 $|\frac{\partial u_x}{\partial y}| \ll 1$ ， $|\frac{\partial u_x}{\partial z}| \ll 1 \dots$ 。

忽略二阶小项，(1.4) 式变为

$$J = 1 + \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 1 + \text{div} \mathbf{u} \quad (1.8)$$

(1.8) 式代入 (1.7) 式并移项即得连续性方程 (1.2)。

波动力学的研究对象只涉及小形变，而爆炸力学中要研究大形变。在地震波研究中，如果用炸药震源激发地震波，近场区内物质元不仅在振动，还在移动，要用爆炸力学研究；而远场区内物质元在振动，平衡点不移动，移动的只是能量，所以地震波的传播可用波动力学描述。本书限定在小形变的波动研究，不涉及爆炸力学。

连续性方程 (1.2) 的含义是，连续介质在波动过程中物质元密度发生变化，变化的幅度与位移矢量的散度成正比。

自然界宏观物体的运动可分为若干种类，振动和波动只是其中的一种。描述宏观物体的运动的物理学分支很多，纵向上可分为经典力学、连续介质力学和非线性动力学三族。经典力学只研究自由空间中物体的无约束运动，如气体在真空中的运动，稀薄空气中分子的布朗运动等。这种运动处于封闭的动力学系统之中，物理上基于牛顿运动定律和万有引力定律，数学上可以归结为常微分方程的初值问题。连续介质力学研究连续介质空间中物体的有约束运动，物理上基于牛顿运动方程和特定的本构方程，数学上可以归结为偏微分方程的初边值问题。弹性波动力学的本构方程为广义虎克定律。连续介质中的连续性方程 (1.2) 是展开连续介质力学的起点。连续介质力学亦可分为静力学和动力学，前者只研究运动未发生时不同结构物质的受力状态，与波动力学无关。物质的运动源于力的作用，波动力学归属于动力学。

宏观物体运动的物理学分支横向上可分为位动、波动和混沌三大类。位动指宏观物体空间位置的位移运动，其中位移运动的方向与作用力同向，如经典力学的飞行、滑行、扭转等；又如连续介质力学的流动（流体力学）、蠕动（固体力学）等。振动指物质元围绕平衡点的周期运动，其中位移运动的方向与作用力反向，波动为振动的传播。经典力学的振动属于封闭系统，波动为开放系统，包括声波（声学）、弹性波（弹性力学）及电磁波（电动力学）等。混沌运动属于自然界广泛发生的非线性