

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 22420051302424

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

反射波走时及其梯度层析成像方法研究

Seismic Reflection Tomography from
Travel-time and Its Gradient Data

黄剑航

指导教师姓名: 张建中 教授

专业名称: 信号与信息处理

论文提交日期: 2008年 月

论文答辩时间: 2008年 月

学位授予日期: 2008年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

常规反射走时层析成像需要拾取连续反射同相轴的走时,并建立同相轴与反射界面之间的对应关系,但对于低信噪比资料,这往往是极其困难的工作。为了克服这个难题,在走时层析成像中引入同相轴梯度是当前的一种发展方向。因此,我们研究了利用走时及其梯度进行联合层析成像的方法。主要的研究工作有:研究了基于局部倾斜叠加原理的反射走时和梯度的自动拾取方法;研究了基于三次B样条函数的光滑速度模型的建模方法;研究了基于标准射线方程的非均匀介质的射线追踪方法;研究了利用旁轴射线理论计算层析反演方程系数矩阵的方法;研究了多类型数据和模型参量的先验信息约束的联合反演方法。

在以上研究基础上,研制了反射走时及其梯度层析成像的计算程序。主要功能包括走时及其梯度的自动拾取,连续介质模型的射线追踪和走时及其梯度的计算,以及走时及其梯度的联合层析反演。拾取模块通过寻找反射记录的局部相关同相轴,自动快速地拾取走时、梯度,还可以通过人机交互界面对拾取数据进行人工修正和质量控制。反演模块利用拾取的走时、梯度等数据,结合多参量优化反演算法和多尺度策略,实现了稳定和高效的反演过程。

本文方法的最大特色之处在于同时使用了反射走时和梯度,从而不需要在较大偏移距范围内拾取连续同相轴走时,而只拾取容易识别的较少的局部相关同相轴的走时和梯度,也不需要人为地确定局部同相轴对应的反射层位,这对于低信噪比资料的处理具有重要实用价值。同时,增加了走时梯度信息,还可以增强对模型参量的约束,降低了反演问题的多解性,提高了反演结果的可靠性。对合成资料 and 实际资料的试验表明,本文的反射走时及其梯度层析成像方法快速稳定,能获得较好的宏观速度模型,为偏移成像提供基础资料。

关键词: 层析成像; 反射波; 梯度

Abstract

The conventional reflection travel-time tomography needs to pick the travel-time of successive seismic reflection event and create the corresponding relation between reflector and event, which is a very hard work for low signal-to-noise ratio data. In order to solve this problem, the introducing of gradient of event in travel-time tomography is a current developing direction. So we research the reflection tomography from travel-time and its gradient data. The main research work includes: The study on automatic picking of travel-time and gradient based on local slant stack; The study on the creation of smooth velocity model based on Cubic B-spline; The study on the ray tracing in heterogeneous media based on normal ray equations; The study on the calculation of inversion matrix based on the paraxial theory; The study on the prior information constrained joint inversion of multi data parameters and multi model parameters.

Based on the research work above, the programs of reflection tomography from travel-time and gradient are developed. The main function includes the automatic picking of travel-time and its gradient, ray tracing in continuum model, the computation of travel-time and its gradient, and joint inversion with travel-time and its gradient. The picking package realizes the quick automatic picking of travel-time and its gradient by seeking the locally coherent event of data. This package can also realize the manual correction and quality control on the interactive interface. The inversion package which combines local optimization algorithm and multi-scale joint inversion algorithm, using travel-time and its gradient as input data, realizes the stable and effective inversion process.

The main characteristic of the method is the using of reflection travel-time and its gradient simultaneous, so instead of successively picking of travel-times of event in a wide range of source-receiver offset, only those fewer travel-times and gradients of locally coherent event which can be easily recognized are picked, and the manual

determination of the reflecting interface of corresponding event is also avoided, which has important and practical value to the processing of low signal-to-noise ratio data. In the meantime, the introducing of gradient of travel-time can also better constrain the model parameters, reduce the multiplicity and improve the reliability of inversion. The experiment on synthetic data and real data shows that the seismic reflection tomography from travel-time and its gradient is fast and stable when executing, and could obtain much better macro-velocity model which is the base of migration imaging.

Key Words: Tomography; Reflection; Gradient

目 录

第 1 章 前 言	1
1.1 层析成像的基本概念	1
1.2 地震层析成像简介	1
1.2.1 地震层析成像发展概况	2
1.2.2 地震层析成像的基本原理	2
1.2.3 地震层析成像的分类	3
1.3 地震反射层析成像的现状与本文研究意义	4
1.4 主要研究内容	7
1.5 取得的主要成果	7
第 2 章 反射波走时及梯度层析成像方法原理	10
2.1 引言	10
2.2 走时梯度的含义	10
2.3 基本原理	12
2.4 数据空间和模型空间	14
2.4.1 数据空间	14
2.4.2 模型空间	15
2.5 本文层析成像方法的基本步骤	16
第 3 章 速度模型和射线追踪方法	18
3.1 引言	18
3.2 速度模型的样条表示方法	19
3.2.1 三次 B 样条函数	19
3.2.2 基于三次 B 样条的速度表示	20
3.3 基于射线方程的射线追踪方法	24

3.3.1 标准射线方程	24
3.3.2 射线路径模拟结果	25
第 4 章 反射波走时及梯度层析反演方法	29
4.1 引言	29
4.2 反演问题的线性化	30
4.3 基于旁轴射线法的反演系数矩阵计算方法	31
4.3.1 旁轴射线法原理	31
4.3.2 反演系数矩阵的计算	35
4.4 初始模型的建立	36
4.4.1 速度模型的初始化	37
4.4.2 反射射线的初始化	37
4.5 SVD 局部优化反演算法	38
4.6 LSQR 联合反演算法	39
4.6.1 LSQR 算法原理	39
4.6.2 迭代停止准则和多尺度策略	41
4.7 先验信息约束及正则化技术	42
4.7.1 本文方法的混定特定	42
4.7.2 数据空间的协方差矩阵 C_D	43
4.7.3 模型空间的协方差矩阵 C_M	44
4.7.4 正则化过程	45
第 5 章 走时和梯度拾取方法及实现	47
5.1 引言	47
5.2 RADON 变换, TAU-P 变换和倾斜叠加原理	47
5.3 梯度自动拾取的局部倾斜叠加原理	48
5.4 梯度拾取的实现	50
第 6 章 资料测试及分析	53

6.1 实验的基本步骤	53
6.2 合成资料试验	53
6.2.1 实例一: Marmousi 简化资料.....	53
6.2.2 实例二: DQ 合成资料.....	59
6.2.3 实例三: SL 合成资料.....	60
6.3 实际资料试验	64
6.3.1 实例一: YL 实际资料.....	64
6.3.2 实例二: CB 实际资料.....	68
第7章 结论与建议	69
参 考 文 献	71
硕士在读期间发表的论文	74
致 谢	75

Contents

Chapter 1 Preface	1
1.1 Basic Concept of Tomography.....	1
1.2 Introduction of Seismic Tomography.....	1
1.2.1 The Development of Seismic Tomography.....	2
1.2.2 Basic Principles of Seismic Tomography	2
1.2.3 Classification of Seismic Tomography	3
1.3 The Present Situation of Reflection Tomography and Researching Significance	4
1.4 Main Research Contents	7
1.5 Main Results.....	7
 Chapter 2 The Main Principle of Seismic Reflection Tomography from Travel-time and Its Gradient Data	 10
2.1 Introduction	10
2.2 The Concept of Gradient	10
2.3 The Basic Idea.....	12
2.4 Data Space and Model Space	14
2.4.1 Data Space	14
2.4.2 Model Space.....	15
2.5 The Basic steps of this Method.....	16
 Chapter 3 Velocity Model and Ray Tracing Method.....	 18
3.1 Introduction	18
3.2 B-Spline Velocity Model.....	19
3.2.1 Cubic B-Spline.....	19

3.2.2 Velocity Model.....	20
3.3 Ray Tracing Method Based on Ray Equations.....	24
3.3.1 Normal Ray Equations.....	24
3.3.2 Ray Tracing Simulation.....	25
Chapter 4 Inversion Problem.....	29
4.1 Introduction.....	29
4.2 Linearization of Inversion.....	30
4.3 Inversion Matrix Based on Paraxial Ray Method.....	31
4.3.1 Paraxial Ray Theory.....	31
4.3.2 Computation of Inversion Matrix.....	35
4.4 Initial Model.....	36
4.4.1 Initialization of Velocity Model.....	37
4.4.2 Initialization of Ray.....	37
4.5 SVD Local Optimization.....	38
4.6 LSQR Joint Inversion.....	39
4.6.1 LSQR Algorithm.....	39
4.6.2 Stopping Criterion and Multi-scale Strategy.....	41
4.7 Prior Information and Regularization.....	42
4.7.1 The Mixed-posed Property.....	42
4.7.2 Covariance Matrix C_d in Data Space.....	43
4.7.3 Covariance Matrix C_m in Model Space.....	44
4.7.4 Regularization.....	45
Chapter 5 The Picking of Travel-time and Its Gradient.....	47
5.1 Introduction.....	47
5.2 Radon Transform, Tau-p Transform and Slant Stack.....	47
5.3 Automation of Gradient Picking Based on Local Slant Stack.....	48
5.4 Realization of Travel-time and Its Gradient Picking.....	50

Chapter 6 Data Testing and Analysis	53
6.1 Basic Steps of Testing	53
6.2 Synthetic Data Testing.....	53
6.2.1 Example 1: Simplified Marmousi Data	53
6.2.2 Example 2: DQ Data.....	59
6.2.3 Example 3: SL Data	60
6.3 Practical Data Testing	64
6.3.1 Example 1: YL Data.....	64
6.3.2 Example 2: CB Data	68
Chapter 7 Conclusions and Proposals	69
References	71
Papers Published	74
Acknowledgement.....	75

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第 1 章 前 言

1.1 层析成像的基本概念

层析成像的含义有别于一般意义上的成像。利用光敏材料把物体表面反射的光波记录下来，这就是照相或录像，这种成像方式属于表面成像。在不切开物体或人体的情况下对其内部结构成像，这种成像方式又可分为全息成像和层析成像。全息成像技术主要用于对物体内部目标的轮廓成像，而层析成像是对物体进行逐层剖析成像，即把不可分割的三维物体假想地切成一系列二维薄片，利用在物体外部通过某种方法采集到的携带物体内部信息的投影数据，重构每个切片上反映物体内部某种特征的图像，然后通过这些切片建立该物体内部的三维图像。这种图像，在医学 X 射线 CT 中分别表示 X 射线穿透人体内脏的强度；在地震波走时层析成像中表示地震波穿过地质体的慢度，即速度的倒数；在衰减系数层析成像中表示地震波穿过地质体时的衰减性质。该技术最大的特点是在不损坏物体的条件下，探知物体内部结构的几何形态和物理参数的分布。

从物体内部图像重建的角度看，一张物体切片的图像是两个空间变量 (x, y) 的函数，称为图像函数，记做 $f(x, y)$ ，用不同方向的入射波“照射”物体，观测到的波场信息至少是入射波方向 θ 和观测点位置 ρ 两个变量的函数，称为投影函数，记做 $u(\rho, \theta)$ 。1917 年数学家 Radon 证明：已知所有入射角 θ 的投影函数 $u(\rho, \theta)$ 可以恢复唯一的图像函数 $f(x, y)$ ，即 Radon 变换。这个定理是层析成像的理论基础[1]。

1.2 地震层析成像简介

地震波层析成像，就是利用人工地震的方法，获取携带有地下介质物理信息的地震波信号，利用求广义 Radon 逆变换的方法，计算出地下介质的物性分布。地震波在从炮点到接收点的传播过程中，会经过不同的介质。由于介质本身的不同物理性质，地震波的振幅、相位(传播时间)、频谱等都会发生变化，通过对这

些变化信息进行处理，进而可以获得地下介质物性分布，推断出其地质构造。

1.2.1 地震层析成像发展概况

地震层析成像是地球物理学的一个研究领域，在上世纪 70 年代首先以井间速度结构调查为研究对象。1979 年, Dines 和 Lytle 首先对地震层析成像做了大量数值模拟，并首先将层析成像(Computerized Geophysical Tomography) 这一名词用于论文的标题。在地震勘探研究领域，自从在亚特兰大召开的第 54 届地球物理勘探学家协会(SEG)年会上设置了地震层析成像研究内容的专题后，地震层析成像的研究在地震勘探领域得以发展。上世纪 80 年代，以 Daily(1984)，Sommerstein(1984)，Bishop(1985)，Dyer 和 Worthington(1988)等人的研究为代表，地震层析成像的理论、方法和技术以数值模拟的形式得到广泛的研究。上世纪 90 年代，在工程勘探、资源勘探、环境保护、文物调查、岩体结构研究等许多领域得到广泛研究。地震层析成像经过地球物理学近三四十年的应用和研究，虽然已经取得了一定成果，但是许多环节仍需要完善。因此这个领域仍是个不断创新不断发展的热门领域[2]。

1.2.2 地震层析成像的基本原理

以走时层析成像为例介绍一下地震层析成像的基本原理。该方法是利用地震记录中的走时信息重建地下介质中速度分布的一种方法。地震波速度与地下介质性质之间有着显著而且稳定的相关性，地震的走时同振幅以及其他波形信息相比，具有信噪比高、各种波走时规律相同等优点，因此地震走时简单通用直观的特点使得走时层析成像方法得到广泛应用。

为了获得地下介质速度分布，通常把介质离散划分为一系列小矩形网格，网格内的速度相同，为了方便起见，用速度的倒数—慢度来表示。地震波以射线的形式在网格间传播，从不同的发射点到接收点经过了不同慢度的网格，因此得到了不同的走时。第 i 条射线的走时可以表示为：

$$t_i = \sum_{j=1}^N l_{ij} s_j \quad (1-1)$$

其中 t_i 表示走时， N 表示网格数目， l_{ij} 表示了第 i 条射线在第 j 个网格中的射线路径长度，且慢度 $s_j, j=1,2,\dots,N$ 按照空间位置先竖直后水平排列。如图 1.1 所示，从 S 到 R 的走时为六段射线走时的总和。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库