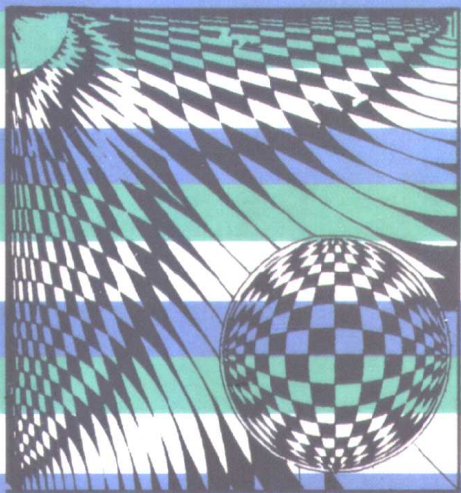


• 华夏英才博士论文文库 •

# 地震正反演与成像

常 旭 刘伊克 / 著



华文出版社

·华夏英才博士论文文库·

# 地震正反演与成像

常 旭 刘伊克 著

华 文 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震正反演与成像/常旭, 刘伊克著. - 北京: 华文出版社, 2001.9

ISBN 7-5075-1180-4

I. 地… II. ①常…②刘… III. ①地震模型法②地震勘探—成像 IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 032909 号

华文出版社

(邮编 100800 北京市西城区府右街 135 号)

电话 (010)83086663 (010)83086853

网址: <http://hwcs.com>

电子信箱: [webmaster@hwcs.com](mailto:webmaster@hwcs.com)

新华书店经销

北京市通县大中印刷厂印刷

850×1168 32 开本 5.875 印张 130 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

\*

定价: 12.00 元

## 作者简介



常旭：女，1992年取得日本京都大学博士学位。主要从事地震层析成像方法研究以及反射地震勘探数字处理方法研究，现任中国科学院地质与地球物理研究所研究员。

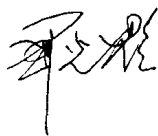


刘伊克：男，1982年毕业于北京大学物理系，后获得中国科学院地球物理研究所博士学位。主要从事地震正反演研究与地震层析成像方法研究，现任中国科学院地质与地球物理研究所副研究员。

## 序

这是一本突出最新学术思想、学术研究价值且兼顾实用技术的专著。本书重点论述当前地震正反演与地震层析成像中的前沿问题和热点问题，从基础研究、理论分析入手，通过实例展示最新成果。全书内容以新为主，读者可以在阅读本书的过程中了解当前地震方法的发展动向，启发读者发现科研工作新的生长点和新的研究课题。本书各章节之间联系密切、系统性强，使读者在阅读全书之后可以对地震正反演与地震层析成像研究的前沿问题有清晰的认识。各章节本身中心内容明确，为读者选读感兴趣的章节提供了方便。本书从基础研究问题到方法技术要点均进行了详细的论述，不论是从事基础研究还是应用研究的读者都可以从中找到自己的所需。书中所列实例都是作者近年来科研工作的实践和积累，作者根据自身实践的心得和体会，置身于读者的位置完成了本书的写作，使本书具备了良好的可读性。我相信此书会引起很多读者的兴趣。

中国地球物理学会理事长  
中国科学院院士



2001年5月

## 内 容 简 介

本书以当前地震勘探的发展及动向为主导,总结归纳了作者及其科研小组近年来在地震正反演与地震层析成像领域的基础研究成果与实践。全书共 8 章,主要内容包括三维地震波场模拟以及偏微分方程多重网格算法、地震层析成像的正反演基本方法、地震层析成像研究中基于分形理论的地震初至走时自动拾取方法、基于图形原理的复杂地质模型三维地震波射线追踪方法、地震层析成像反演算法解的误差分析与解的分辨率研究。本书还汇编了大量的实例,读者可根据这些实例,了解前沿课题和新方法的实现过程。本书可供地球物理和地震勘探专业的科研及技术人员参考。

# 前 言

地球物理方法中的地震方法是根据弹性波理论及其在地层介质中的传播规律调查了解地下介质的物理性质的一种方法。随着世界电子工业的迅速发展，地震方法已经从最初的模拟信号时代发展到了现在的高精度数字化时代，地震方法调查的对象也不再局限于石油和天然气资源。地震方法在深度和广度上的发展要求其基础研究更完善、方法技术更简捷方便。

本书作者着眼于当前地震方法研究的一些热点问题，介绍了最新基础研究成果和方法技术，供从事地震方法研究的科研人员阅读和参考。本书的全部素材选自作者及其科研小组近年来的科研成果与实践。这些科研成果曾经得到中国科学院 KZCX2-112 项目、国家自然科学基金委员会 49674236、49974005、49974025 等项目以及国家 863 计划 820-03-03 项目的资助，这些资助是科研工作顺利进行的保证。在本书的写作完成之时，作者对这些科研资助表示感谢。

本书主要内容包括以下几个方面：

在三维地震波场数值模拟算法研究领域，针对地震波正演问题，偏微分方程有限差分法存在计算量大的缺陷，特别是在三维空间，这一问题更为突出。本书论述了多重网格算法在解偏微分方程中的应用，有效地利用了迭代过程误差在粗网格的修正特性和对高频误差的修正特性，改变了传统求解偏微分方程的方法，使三维偏微分方程求解计算量减少到  $O(N)$ ，为地震波场的数值模拟提供了能满足精度要求且稳定的算法。

在地震层析成像研究领域，针对初至拾取问题给出了基于分形理论的方法，本书根据分形理论的标度无关性论述了地震道的统计自相似性质，通过计算地震道分数维及其对分维曲线拐点的

定量分析实现了初至波的自动识别，为相邻道不相关条件下的初至拾取问题提供了一种定量化程度高的有效方法，扩展了分形理论在地震勘探中的应用。针对复杂地质模型的三维地震波射线追踪问题，提出基于图形方法的直达波、折射波、透射波和反射波的射线追踪方法，这种方法的优点是计算量仅与模型的大小有关，而与模型的复杂程度无关，并且可对直达波、折射波、透射波和反射波实现同步追踪，为三维地震波射线追踪开发了一种不受模型复杂程度约束的有效方法。对地震层析成像反演算法，本书着重论述了反演算法解的误差分析与解的分辨率估计，为评价反演算法的可靠性提供了有效方法。针对地震波衰减层析成像问题，本书分别论述了脉冲宽度成像、振幅衰减成像中如何定义地震脉冲的频率以及如何拾取地震脉冲的振幅等方法，分析了现行各方法中的合理性与矛盾，讨论了这些方法的理论问题。

书中汇编了大量的实例，读者可根据这些实例，了解前沿课题和新方法的实现过程及效果。每一个实例都详细介绍了从数据观测、方法研究、技术问题到最终结果的详细过程，作者还给出了在实践中关于如何解决各环节技术问题的经验，同时提供了许多有参考价值的建议。根据本书内容，读者完全可以对书中所述的各种新方法进行实践。

全书共8章，第1章为绪论，简要论述地震勘探和地震层析成像发展历史及近年来研究工作的难点和热点，对该学科近年来的发展动向及前沿课题提出作者的认识。

第2章主要内容为地震波场数值计算方面的基础理论，在这一章中介绍了多重网格有限差分算法求解波动方程的方法以及二维和三维地震波场的数值模拟方法和计算实例。

第3章主要论述地震层析成像方法的基础理论、地震层析成像反演地下介质物理性质的基本算法。

第4章讨论地震波衰减层析成像问题，根据振幅衰减成像和脉



冲宽度衰减成像两种方法论述地震波衰减层析成像的方法研究。

第5章论述地震层析成像中地震波走时自动拾取问题，讨论当前各类走时自动拾取方法的长处及缺陷，给出分形算法用于走时自动拾取的理论方法依据和实用技术。

第6章讨论地震层析成像中的三维射线追踪问题，重点介绍基于图形原理的适用于复杂地质模型的射线追踪方法。

第7章论述地震层析成像反演算法解的误差分析与分辨率估计。

第8章介绍作者及其科研小组近年来在地震层析成像实际应用方面的部分研究实例。主要介绍在近地表结构研究及地震三维静校正研究方面、在石油天然气储集层横向变化预测方面，在地壳速度结构研究方面、在固体矿产资源调查方面，在岩体结构评价方面的几个应用实例。

本书涉及的研究内容与成果得到地球物理学界刘光鼎院士、陈颀院士、姚振兴院士、滕吉文院士、刘福田研究员的热心指点，还得到很多同行研究人员以及作者所在科研小组贺瑞卿博士、王辉博士的支持，在此表示衷心的感谢，同时也希望读者提出宝贵的意见。

# 目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 地震层析成像研究发展概况	(1)
1.2 地震波与岩石物性	(4)
第 2 章 地震波场的正演数值计算	(8)
2.1 波动方程正演问题	(8)
2.2 二维地震波场显式差分算法	(9)
2.3 三维地震波场显式差分算法	(15)
2.4 三维波动方程隐式差分格式及多重网格算法	(18)
2.5 数值计算实例	(23)
第 3 章 地震层析成像的理论基础	(26)
3.1 基本概念	(26)
3.2 图像重建技术	(29)
3.3 计算方法	(34)
第 4 章 地震波衰减层析成像	(37)
4.1 振幅衰减成像	(37)
4.2 脉冲宽度衰减成像	(39)
4.3 震源影响的消除	(41)
第 5 章 地震层析成像中的分形走时拾取	(46)
5.1 走时拾取的基本研究方法	(46)
5.2 地震道时间序列的统计自相似性质	(47)

5.3	地震道时间序列的分数维计算	(48)
5.4	分数维性质与地震初至的关系	(57)
5.5	走时自动拾取的实例	(61)
5.6	小 结	(64)
<b>第6章 三维地震波射线路径的追踪</b>		(65)
6.1	三维地震波射线路径问题	(65)
6.2	最小走时射线路径方法原理	(67)
6.3	最小走时射线路径算法的实现	(70)
6.4	反射波射线追踪方法	(80)
6.5	小 结	(83)
<b>第7章 地震层析成像反演算法解的误差分析与分辨率估计</b>		(85)
7.1	条件数非常大的病态方程	(86)
7.2	三种反演算法解的误差分析	(87)
7.3	非常病态方程解的分辨率估计	(95)
7.4	小 结	(101)
<b>第8章 地震层析成像的应用实例</b>		(103)
8.1	三维近地表速度反演及层析静校正研究	(103)
8.2	石油天然气储集层预测研究	(117)
8.3	地壳速度结构研究	(129)
8.4	隐伏矿脉的空间定位研究	(147)
8.5	岩体结构研究	(157)
<b>参考文献</b>		(163)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 地震层析成像研究发展概况

地震层析成像是地球物理学的一个研究领域。在地球物理学研究中勘探地球物理是一个年青的学科，它起源于 20 世纪 30 年代。早期的地球物理勘探和地球物理方法从属于地质方法，即地质学家预测一个构造，地球物理学家用他们的原始的勘探技术去验证这一结构。60 年代，地球物理学家获得了地下二维数字记录，使得地球物理学家从野外回到了室内，为从数字记录中获得地下结构的图像开始了精细的数据处理与解释的研究。80 年代，随着计算机工作站的发展，数字处理技术从二维向三维迅速发展，地球物理学家可以清晰地看清地下结构的图像。从而地球物理学完成了从受地质学驱使到驱动地质学发展的循环（Russell, 1999），即地球物理学家通过使用地球物理的数据采集技术、数字处理技术和可视化技术看清三维地下结构。目前，勘探地球物理已成为一个经济和生产领域的高技术。

地震层析成像的研究自 70 年代以井间速度结构调查为研究对象在地学界初露头角（Bois et al., 1972）。Dines 和 Lytle (1979) 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（Atlanta）召开的第 54 届地球物理勘探学家协会（SEG Society of Exploration Geophysicists）年会上设置了地震层析成像研究内容的专题之后，地震层析成像的研究在地震勘探领域得以发展。80 年代，以 Daily (1984), Somerstein (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。90 年代, 在工程勘探、资源勘探、岩体结构研究等许多应用领域得到实验性研究。

Anderson (1984) 用 CT 技术着手全球构造研究, 并公布了全球三维速度结构。近年地震层析成像研究又有了长足的发展, Rob VanderVoo 等 (1999) 在 *Nature* 上发表了用地震层析成像方法证明当 Mongol-Okhotsk 和 Kular-Nera 海闭合时, 蒙古-中国华北块体与 Omolon 块体的结合, 引起了西伯利亚的侏罗纪残余块体在中生代俯冲的论文。另外, 地球物理勘探已经打破了只进行资源勘探的局限, 其方法渗透到了经济建设的许多领域。常规地震勘探理论大都建立在岩石介质是均匀层状, 各向同性的物理基础上。在这一前提下, 地震勘探在调查沉积盆地内的石油、天然气资源方面取得了重大的成就。对于非均匀层状介质地区的各类地质调查, 勘探目标常处于复杂介质地区, 因此对地球物理勘探精度的要求越来越高, 如何在现有技术水平之上进一步提高勘探精度已成为地球物理勘探领域面临的重要课题之一。在石油、天然气勘探领域, 勘探对象已经由沉积盆地内大规模的背斜圈闭转向盆地边缘小规模且形态复杂的地层及岩性圈闭; 在金属矿床勘探领域, 隐伏矿产资源的精确调查已经提到了日程; 在煤田勘探与开发中, 预测小断层、裂缝带的分布状态相当重要; 在工程地质领域, 对于地下结构的勘探程度则要求更高。因此, 地球物理勘探不仅要在常规方法的基础上研究提高精度的各种手段, 还应该开发新的勘探方法。地震层析成像就是 70 年代出现在物探领域的方法, 经过地球物理学者们近 30 年的研究, 虽然已经开始用于生产实践, 但仍有许多需要完善的环节。为此, 必须开展长期的深入细致的科研工作。

70 年代的重大科技进展之一的 CT 技术 (Computer Tomog-

raphy) 问世以来, 在医学界及工业测试等领域得到了迅速的发展。80 年代, 这一技术进入地学研究领域, 称为地学层析成像 (geotomography)。地学层析成像是用医学 X 线 CT 的理论对地下进行探查的方法的总称, 是一种详细调查地下物性参数分布状况的物探技术。这一技术在全球构造、石油天然气、金属矿床、地热等资源勘探领域以及土木建筑、灾害防治等领域得到广泛地研究。根据传播的介质的不同, 地学层析成像的研究内容又分为地震层析成像 (seismic tomography)、电磁波层析成像 (electromagnetic tomography) 和电阻率层析成像 (resistivity tomography)。

地震层析成像是地学层析成像的研究内容之一。在地震层析成像中, 按波的传播类型区分, 其研究内容可分为透射层析成像、反射层析成像、绕射层析成像等等; 按反演的物性参数区分, 其研究内容可分为利用地震波的传播时间反演地震波传播速度的波速层析成像以及利用地震波振幅的衰减反演地震波衰减系数的衰减系数层析成像。由于地震波的速度与介质的各种物理性质有关, 且地震波的传播时间又较容易观测, 因此, 利用地震波的传播时间求取地震波传播速度的方法得到广泛地研究。

地震波速度层析成像方法与医学 X 线 CT 的主要区别在于: 其一, 地震波在介质中的波阻抗界面产生折射, 其射线路径为未知; 而 X 线的射线为直线, 其射线路径为已知。其二, 地震波速度层析成像中震源及观测点的位置受地表、钻孔、坑道等的限制, 不能对调查对象进行全方位观测; 而医学 X 线 CT 能做到全方位观测。为了使地震波速度层析成像方法有效地用于地下调查, 在 80 年代, 研究工作的主要着眼点在于根据计算机的数字模拟和物理模型的实验模拟来研究解决上述问题的方法。在此期间, 射线追踪方法、空间域反演方法等不同于医学 X 线 CT 的方法得到发展。在这些研究成果的基础上, 90 年代起, 研究工作开始

进入实用阶段。已有大量的文献记载了地震层析成像技术在实际调查中的尝试。今后，地震层析成像技术的研究不仅会在反演数值计算方法开发与反演精度的提高方面得到进一步的研究，而且在方法的适用性、反演方法的评价、反演结果的地质解释方面也会引起人们的研究兴趣。

## 1.2 地震波与岩石物性

### 1.2.1 岩石性质与地震波速度

#### 1.2.1.1 地震波的速度与岩石物性的关系

地震波纵波与横波在介质中的传播速度与介质的弹性常数之间具有以下定量关系：

$$V_p = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} = \frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - \nu)}, \quad (1-2-1)$$

$$V_s = \frac{\mu}{\rho} = \frac{E}{2\rho(1 + \nu)}, \quad (1-2-2)$$

(1-2-1) 式与 (1-2-2) 式中： $V_p$  表示纵波速度； $V_s$  表示横波速度； $\lambda$  表示拉梅系数； $\rho$  表示介质密度； $E$  表示杨氏模量； $\nu$  表示泊松比。(1-2-1) 式与 (1-2-2) 式反映了波速与岩石性质的基本关系式。不同种类岩石的弹性性质不同，因此波速也不同。大多数火成岩与变质岩没有或只有很少的孔隙，地震波速主要取决于构成这些岩石的矿物本身的性质。一般说来，火成岩的波速较高且变化范围小，变质岩的波速变化较宽，沉积岩的波速较低且变化范围大。

#### 1.2.1.2 地震波速度与岩石孔隙度的关系

Wyllie (1956) 提出，当地层压力对波速的影响可以忽略时，波速的大小主要取决于孔隙度和矿物成分。Wyllie 的时间—平均方程 (Wyllie, 1956) 经验地、在相当宽的孔隙度范围内把

波速和岩石参数关联起来。时间—平均方程为：

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{V_F} + \frac{1-\phi}{V_M}, \quad (1-2-3)$$

(1-2-3) 式中， $\phi$  表示孔隙度， $V$  表示流体饱和的岩石速度， $V_F$  表示孔隙流体的速度， $V_M$  表示岩石基质的速度。当岩石基质的速度与岩石孔隙中流体的速度已知时，(1-2-3) 式就说明了孔隙度与岩石波速之间的关系。

### 1.2.1.3 地震波速度与岩石孔隙中流体饱和度的关系

1976 年，美国德克萨斯大学的 Gregory (1976) 发表了自己的实验数据：岩石的波速在一定压力的条件下随其孔隙中流体饱和度的不同而变化，其纵波速度的变化幅度大约可达 25%。

### 1.2.1.4 地震波速度与地层温度的关系。

Gregory 的实验数据还揭示：岩石的波速随压力和温度的不同而变化。当压力为某一常数，温度由 24℃ 增至 750℃ 时，纵波波速的变化在干岩中大约为 63%，在水饱和岩石中大约为 33% (Gregory, 1976)。

### 1.2.1.5 地震波速度与岩石密度的关系

Gardner 等人对于不同岩石的速度与密度之间的关系进行了实验，并给出了经验关系：速度与密度间成 0.25 次幂关系 (Gardner et al., 1974)。即：

$$\rho = 0.25 V^{0.25}, \quad (1-2-4)$$

(1-2-4) 式中， $\rho$  表示岩石密度， $V$  表示波速。

## 1.2.2 岩石性质与地震波衰减

地震波在传播过程中，岩石介质对其能量具有不同程度的吸收作用，这也可以被称作是岩石介质的地震波衰减特性。通常岩石介质的地震波吸收衰减程度可以用以下两个参数来描述：

### 1.2.2.1 吸收系数

平面纵波在粘滞介质中传播的振幅表达式为：



$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha r} \cdot e^{j(\omega t - kr)}, \quad (1-2-5)$$

式中  $A_0$  为初始振幅,  $r$  为传播距离。该式说明平面纵波在粘滞介质中传播时, 其振幅按指数规律衰减, 衰减的快慢则由式中的  $\alpha$  值来确定, 则称  $\alpha$  为衰减系数或吸收系数。

#### 1.2.2.2 品质因子

地震波的衰减特性还可以用一个与衡量无线电路中损耗完全相似的参数—品质因子来描述。品质因子被定义为: 在一个周期内 (或一个波长距离内), 振动所损耗的能量  $\Delta E$  与总能量  $E$  之比的倒数。即:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta E/E}{2\pi} = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad \text{或} \quad \frac{2\pi}{Q} = \frac{\Delta E}{E}, \quad (1-2-6)$$

$Q$  值是一个无量纲量, (1-2-6) 式表明  $Q$  值越大, 能量的损耗越小, 介质越接近完全弹性体。由 (1-2-5) 式可知, 一个波长  $\lambda$  距离内的相对能量损耗量为:

$$\frac{\Delta E}{E} = 1 - (e^{-\alpha \lambda})^2 = 1 - e^{-2\alpha \lambda},$$

由式 (1-2-6) 式有:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1 - e^{-2\alpha \lambda}}{2\pi} \approx \frac{\alpha \lambda}{\pi} = \frac{\alpha V_p T}{\pi}, \quad (1-2-7)$$

于是可以求得吸收系数  $\alpha$  与品质因子  $Q$  之间的关系为:

$$\alpha = \frac{\pi f}{QV_p} \quad (1-2-8)$$

综上所述, 地震波速度和地震波的衰减与岩石性质有密切的相关性, 因此, 一旦掌握了这些资料就不仅可以作出对地下结构的认识, 还可以作出有关岩石性质的推断。例如, 在石油、天然气的详探和开发阶段, 可以根据波速资料推断岩石类型和岩石孔隙度的大小, 估计岩性圈闭范围; 根据波速推断岩石孔隙中流体