



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

冯波 王华忠 著

数据域波动方程 层析速度反演方法研究

Data Domain Wave Equation Tomography
for Velocity Inversion



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

冯波 王华忠 著

数据域波动方程 层析速度反演方法研究



Domain Wave Equation Tomography
for Velocity Inversion



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

岩性油气藏的精确描述是勘探地震学的重要目标。小尺度地质体的精确构造成像、振幅保真的成像、反射系数与弹性参数的精确估计是勘探地震学中的核心问题。通过本书给出的透射波和反射波层析成像方法,可以建立较为准确的宏观背景速度。在此基础上,利用最小二乘偏移理论,可以估计高波数的模型扰动。

本书可供高等院校、科研院所相关领域的教师、科研人员、研究生及高年级本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

数据域波动方程层析速度反演方法研究 / 冯波,王华忠著. —
上海:同济大学出版社,2017.8
(同济博士论丛/伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6994-0

I. ①数… II. ①冯… ②王… III. ①波动方程—反演算法
IV. ①O175.21②O177.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 100276 号

数据域波动方程层析速度反演方法研究

冯 波 王华忠 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 张智中 熊磊丽

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 16.5

字 数 330 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6994-0

定 价 96.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

岩性油气藏的精确描述是勘探地震学的重要目标。小尺度地质体的精确构造成像、振幅保真的成像、反射系数与弹性参数的精确估计是勘探地震学中的核心问题。随着高性能计算机技术的快速进步以及全方位、高密度、宽频带的地震数据采集技术的飞速发展,以估计全波数带的弹性参数为目标的全波形反演方法(FWI)再次成为勘探地震学中的研究热点。而(各向异性)逆时偏移(RTM)方法的成功实用化进一步推动了对 FWI 技术的研究。然而,由于叠前地震数据的不完备(有限观测孔径或波数域覆盖范围)、正演模型的不完善(正演算子无法精确描述地震波在实际介质中的传播过程)、初始模型不够精确、地震子波的未知等多种因素制约,使得经典的 FWI 难以达到其理论预计的目标,甚至在实际应用中不收敛。

为了发展一套合理的背景速度估计技术,推动 FWI 的实用化,本书提出了逐步线性化反演的技术路线。为实现这一目标,本书主要从以下四个方面展开研究:

第2章中给出了逐步线性化反演的抽象表达。通过引入模型尺度分解、数据特征分解以及正问题的线性化近似等,将非线性的 FWI 问题用三步线性化反问题(即透射波层析成像、反射波层析成像以及最小二乘偏

移)逼近。为实现这一流程,首先需要对地震数据进行分解,得到透射波和反射波等波型,相关内容将在本书的第3章详细阐述。对于透射波和反射波层析成像问题,本书抛弃了经典的波形拟合准则,改用更为稳健的走时逼近准则,试图反演低波数的背景模型扰动,相关理论将在第4章和第5章中讨论。高波数的模型扰动可以通过最小二乘偏移理论估计。考虑到最小二乘偏移理论已经较为完备,本书不做探讨。

第3章中提出了叠前地震数据的特征波场合成方法,实现了地震数据的特征分解。该方法利用局部波前的线性特征同时在中心炮检点处对地震记录进行局部倾斜叠加,将其投影到局部平面波域中,实现了高维空间中地震信号的稀疏表达并同时在地震数据分离为单独的震相。因此,利用特征波场合成方法,可以将地震数据分解为初至波、反射波等波现象,从而为下文中的透射波和反射波层析成像方法提供输入数据。

第4章主要研究波动方程透射波层析成像问题。首先,从单频谐波的相位延迟和群延迟的定义出发,基于波动方程的 Rytov 近似,定义了两类单频走时敏感度核函数(TSK)的表达,即:基于相位延迟关系的 TSK(传统方法导出的走时敏感度核函数)以及基于群延迟关系的 TSK(即瞬时走时敏感度核函数)通过分析相位延迟单频核函数与互相关方法导出的带限核函数的内在联系,提出了带限地震波走时敏感度核函数的统一表达形式,并给出了时-空域 TSK 的显式计算方法。在此框架下,前人的研究成果可以统一表达。接着,通过群延迟关系推导了瞬时走时敏感度核函数的表达,并与相位延迟核函数进行对比。然而,数值试验表明瞬时走时敏感度核函数所预测的走时扰动与真实走时扰动的偏差较大,因此相应的正、反问题仍然有待研究。此外,本书还分析了子波的相位误差对不同时差测量方法的影响,并指出波动方程走时层析方法需要考虑子波的相位误差对反演结果的影响(或需要精确估计子波)。最后,讨论了透

射波走时层析反问题的具体实现策略,并用二维合成数据和实际资料验证了书中方法的有效性。

第5章中主要研究波动方程反射波层析成像问题。首先,分析了近两年来提出的反射波形反演方法(RFWI)的优点及其局限性,并指出了RFWI对经典的FWI的启发在于:用FWI梯度中的低波数部分更新背景速度模型,提高FWI的收敛性。接着,考虑到RFWI仍然无法克服“周期跳”问题的制约,提出了基于特征波场分解方法的反射波走时层析成像方法。通过对叠前地震数据的特征波场分解并用互相关函数测量反射波时差,构造了基于一次反射波时差L2范数的目标泛函并给出了梯度类的求解算法。降低了对初始模型精度的要求,且无须长偏移距的观测数据以及低频信息。考虑到在反射层析中,一次反射波的走时同时受到背景速度和反射界面空间位置的影响,用成像道集的部分角度叠加近似“带限”反射系数,建立了反射界面位置与背景模型的联系,消除了背景速度与反射界面深度的耦合关系。因此克服了反射界面“真深度”未知对速度估计的影响,降低了反问题的非线性程度并加速了反演收敛。此外,借鉴图像处理领域中的稀疏正则化理论,提出了反总变差滤波方法。可以快速提取泛函梯度中的光滑部分(即低波数部分)作为模型更新方向,有利于反演的全局收敛。

通过本书中给出的透射波和反射波层析成像方法,可以建立较为准确的宏观背景速度。在此基础之上,利用最小二乘偏移理论可以估计高波数的模型扰动。

主要符号对照表

英文简写	英文全称	中文全称
ADCIG	angle domain common image gather	角度域共成像点道集
CIG	common image gather	共成像点道集
CWD	characteristic wave decomposition	特征波场分解
CWI	characteristic wave imaging	特征波场偏移成像
DSO	differential semblance optimization	差异相似优化
FWI	full waveform inversion	全波形反演
LSPSDM	least squares prestack depth migration	最小二乘叠前深度偏移
LSRTM	least squares reverse time migration	最小二乘逆时偏移
LRT	Linear Radon transform	线性拉东变换
MVA	migration velocity analysis	偏移速度分析
NMO	normal moveout	动校正
PSDM	prestack depth migration	叠前深度偏移
PSPM	partial stacking power maximization	部分叠加能量最大化
PSTM	prestack time migration	叠前时间偏移
RFWI	reflection full waveform inversion	反射全波形反演
RMO	residual moveout	剩余时差
RTM	reverse time migration	逆时偏移

续 表

英文简写	英 文 全 称	中 文 全 称
SK	sensitivity kernel	敏感度核函数
SPM	stack power maximization	叠加能量最大化
TFWI	tomographic full waveform inversion	层析全波形反演
TSK	traveltime sensitivity kernel	走时敏感度核函数
WEMVA	wave equation migration velocity analysis	波动方程偏移速度分析
WERTT	wave equation reflection traveltime tomography	波动方程反射走时层析

目 录

总序

论丛前言

前言

主要符号对照表

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 成像域速度反演方法	3
1.2.2 数据域速度反演方法	5
1.3 研究内容	8
第 2 章 地震波反演成像的基本概念	11
2.1 地震波反演成像的概率论观点	11
2.1.1 贝叶斯反演理论	11
2.1.2 最大后验概率估计与正则化的联系	13
2.1.3 L_2 范数下反问题的求解方法	15

2.1.4	经典 FWI 理论的局限性	16
2.2	从 L2 范数到 L1 范数	18
2.2.1	L1 范数作为模型约束准则的引入	19
2.2.2	原对偶临近算法原理	20
2.2.3	原对偶临近算法的应用	24
2.2.4	小结	28
2.3	逐步线性化反演方法	28
2.3.1	模型尺度分解	29
2.3.2	波动方程正问题的线性化近似	29
2.3.3	逐步线性化近似的反演流程	33
2.4	讨论与结论	35
第 3 章	特征波场合成与偏移成像	37
3.1	引言	37
3.2	特征波场合成	39
3.2.1	地震数据进行特征波场表达的必要性	39
3.2.2	传统的局部平面波的估计方法	40
3.2.3	基于特征波场合成的局部平面波估计方法	43
3.3	特征波场偏移成像	46
3.4	数值试验	48
3.4.1	随机噪声对特征波场合成的影响	48
3.4.2	初至波场合成	52
3.4.3	反射波场合成	54
3.4.4	特征波偏移成像	56
3.5	讨论与结论	58