



同济大学 1907-2017
Tongji



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

刘玉柱 马在田 著

菲涅尔体地震层析 成像理论与应用研究

Theory and Applications of Fresnel Volume
Seismic Tomography



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

刘玉柱 马在田 著

菲涅尔体地震层析 成像理论与应用研究

Theory and Applications of Fresnel Volume
Seismic Tomography



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书包括理论研究和应用研究两部分内容,利用菲涅尔体对复杂介质中地震波的传播进行更精确的描述,进而发展精度、分辨率更高的菲涅尔体地震层析成像理论、方法和技术,为地球内部结构研究、油气勘探以及工程探测等领域提供具有更高反演精度的地震层析技术。既有重要的理论意义,又有广泛的应用前景和现实意义。

图书在版编目(CIP)数据

菲涅尔体地震层析成像理论与应用研究/刘玉柱,
马在田著. —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 - 6947 - 6

I. ①菲… II. ①刘…②马… III. ①地震层析成像
—研究 IV. ①P631. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093346 号

菲涅尔体地震层析成像理论与应用研究

刘玉柱 马在田 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 郁 峰 卢元姗
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 12. 75
字 数 255 000
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 6947 - 6

定 价 98.00 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交流合作,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

地震层析成像技术在地球内部结构研究、油气勘探以及工程探测领域得到了广泛的应用。传统走时层析成像技术基于高频近似射线理论,造成射线路径沿高速区域优势采样,而没有考虑地震数据的有限频带特征,只能反演速度结构空间变化的低波数成分,导致反演精度不高,影响了对地球内部结构的深入认识,也阻碍了对油气储层的精细识别。波动方程地震层析尽管理论上反演精度更高,但地震子波反演困难、资料信噪比低、实际地震波传播的准确描述困难、反演非线性程度高、对初始模型要求严格等诸多现实问题严重制约了其在实际地震资料反演中的应用。为了发挥走时层析快速、稳定的优点,同时考虑地震波的有限频带特征,克服其对低速异常体的不敏感性,本书利用菲涅尔体对复杂介质中地震波的传播进行更精确地描述,进而发展精度、分辨率更高的菲涅尔体地震层析成像理论、方法和技术。为地球内部结构研究、油气勘探以及工程探测等领域提供具有更高反演精度的地震层析技术。因此,该项研究既有重要的理论意义,又具有广泛的应用前景和现实意义。

本书的研究内容包括理论研究与应用研究两部分。

理论研究主要体现在第2章,研究内容与取得的研究成果如下:

① 根据地震波传播的有限频理论,对于某个特定震相,不仅射线路径上的点对该观测信息具有影响,射线领域上的其他点对接收信息也具有影响,这种影响可以用核函数来表达。本书基于波动方程的 Born 近似与 Rytov 近似,给出了非均匀介质透射地震波振幅与走时菲涅尔体层析单频、带限核函数的计算方法。通过对均匀介质透射地震波菲涅尔体层析核函数解析表达式的理论模型实验与分析,给出了不同维度振幅、走时单频与带限菲涅尔体的空间分布范围与分布特征。尤其是在理论上导出,并不是任何情况下菲涅尔体的空间分布范围都等于 $T/2$,不同维数、不同地震属性信息对应的菲涅尔体的空间分布范围是不同的。二维振幅、三维振幅、二维走时、三维走时菲涅尔体的空间分布范围分别为 $T/8, 2T/8, 3T/8$ 与 $4T/8$ 。同时,在理论上证明了传统射线层析成像方法与频率趋向于无穷时的菲涅尔体地震层析成像方法的等效性,进而对射线层析在以往的成功应用给出了解释。将本书的走时菲涅尔体层析成像方法应用于表层速度结构反演中,理论模型试验与实际资料处理结果表明,透射波菲涅尔体地震层析成像方法比传统的初至波射线层析成像方法具有更高的反演精度。② 考虑到反射波可以分解为上行与下行两个透射波,在透射菲涅尔体地震层析成像理论研究的基础上,本书又开展了反射菲涅尔体地震层析成像方法的研究。给出了反射波菲涅尔体边界的确定方法及层析核函数的计算方法,并总结了反射菲涅尔体的特征。理论模型实验同样证实了反射菲涅尔体层析相对于反射射线层析的优越性。③ 本书通过对波前弥合现象的分析定性地对透射波射线走时层析、菲涅尔体走时层析成像方法的反演能力进行了评价,指出射线走时层析方法只能反演出高速异常体,菲涅尔体走时层析方法只能反演出大尺度异常体,低速小尺度异常体无法用基于射线或有限频的透射波走时层析成像方法反演出来,该结论在理论模型上得到了验证。书中同时总结了



波在小尺度异常体中的传播特征,指出香蕉-甜饼圈(Banana-doughnut)现象是波前弥合现象导致的,尤其是指出地震波在低速异常体中会反复震荡,震荡过程中不断散射能量,在传播方向与反传播方向上表现为两个次级源激发。当异常体很小时,前后激发的波前面重合,异常体表现为一个单一的次级源,形成散射。④在前人方法的基础上,提出了计算菲涅尔体地震层析成像分辨率的优化方法。通过理论模型实验,对地面观测系统与井间观测系统的菲涅尔体地震层析成像分辨率规律进行了总结,进而提出了变网格层析成像方法的模型剖分策略。⑤总结了分别基于运动学射线追踪与动力学射线追踪快速计算格林函数的方法。尤其是提出采用高斯束近似计算傍轴格林函数,进而弥补目前动力学射线追踪只能计算射线路径上格林函数的缺点,同时克服了双程波或单程波波动方程数值计算格林函数效率低、占用内存大的缺点。

菲涅尔体地震层析成像理论的应用研究在第一部分的理论模型实验与实际资料处理中有所体现,但由于其过于琐碎,且技术性较强,谈不上创新,所以没有在本书的第一部分中较多地进行叙述。但本书的第3章与第4章对应用研究部分加以了详细的叙述。需要注意的是,本部分所研究的方法或策略并不完全针对菲涅尔体地震层析成像方法,对基于射线理论的层析成像方法同样适用。主要研究内容及取得的成果如下:①通过对初至层析目标函数的性态分析,总结了地震层析成像对初始模型的依赖性,进而提出了基于先验模型的层析初始模型建立方法。②为了缓解地震层析成像的多解性及不稳定性,增强对先验信息的有效利用,在前人给出的地震层析成像正则化方法的基础上,本书对地震层析成像中的先验信息进行了分类,并提出了相应的正则化方法。尤其是提出了针对不等式约束的罚函数正则化方法。③基于层析中使用的初至数据范围与不同深度层析反演精度关系的经验认识,本书提出采用多偏移距

范围(MOR)层析反演策略以提高表层建模精度。考虑到多偏移距范围反演策略实质上是根据偏移距信息对数据的一种加权实现,本书进一步提出了偏移距加权初至层析成像方法。④ 为了对反射层析中速度、反射界面深度进行解耦,本书提出结合零偏(近偏)剖面的速度、深度交替迭代逐层反演的反射层析反演策略。⑤ 为了有效利用更多的观测数据反演表层速度结构,提出了反射、初至串联的联合层析反演策略。⑥ 为了减小静校正误差,同时为了能够直接在起伏基准面上进行成像,本书提出了高频静校正方法及相应基准面的确定方法。提出的上述应用研究方法或策略都在理论模型或实际资料处理中进行了测试,其有效性得到了证实。⑦ 本书根据整理出的3 419次震级在5.5级以上1 411 695台站次地震记录中的初至P波到达时信息进行了全球层析成像应用研究。该研究成功展示了典型的全球动力学特征,同时给出了一些新的认识。

不妨将融合了菲涅尔体概念的有限频理论称为菲涅尔体理论。如本书理论部分所述,菲涅尔体不单是一种空间范围,而是具有某种属性信息的两点间某一特定震相地震波主能量的传播范围。除本书的菲涅尔体地震层析成像方法外,菲涅尔体理论还提供了一种新的地震波传播描述手段,还可以应用于有限频地震偏移成像及速度分析等。因此,菲涅尔体理论对地震波的正反演皆有重要的指导作用。本书研究的只是菲涅尔体理论在地震层析成像反演方法中的应用,因此需要继续研究的内容还很多。即使本书专门针对的是菲涅尔体地震层析成像理论与方法研究,但该研究仍然不够深入与全面。如本书理论研究部分没有给出菲涅尔体走时的计算方法,没有进行振幅(另一非常重要的地震属性信息)菲涅尔体地震层析成像方法的应用研究,应用研究部分的三维菲涅尔体地震层析成像的计算量仍然很大,难以反演得到精细的三维速度结构。所有这些不完善或尚未开展的工作将在以后的短期、中期和长期研究工作中完成。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章	引言	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究现状	2
1.3	研究内容	7
第 2 章	菲涅尔体地震层析成像理论与方法	9
2.1	波动方程地震层析成像	9
2.1.1	波动方程的 Born 近似与 Born 波路径	10
2.1.2	波动方程的 Rytov 近似与 Rytov 波路径	13
2.2	透射波菲涅尔体地震层析成像	16
2.2.1	菲涅尔体层析方程	16
2.2.2	层析核函数的计算	17

2.2.3	层析核函数的性质及菲涅尔体边界的确定	20
2.2.4	实例	24
2.2.5	讨论	31
2.2.6	小结	34
2.3	反射菲涅尔体地震层析成像	34
2.3.1	反射菲涅尔体的计算	35
2.3.2	反射菲涅尔体边界的确定	35
2.3.3	反射菲涅尔体特征分析	37
2.3.4	反射菲涅尔体地震层析成像	39
2.3.5	结论与讨论	43
2.4	波前弥合现象对地震层析成像的影响	43
2.4.1	实验方法	44
2.4.2	实验结果与分析	46
2.4.3	理论模型验证	51
2.4.4	结论与讨论	55
2.5	地震层析成像的分辨率	55
2.5.1	引言	56
2.5.2	计算方法	58
2.5.3	数值模拟实验	60
2.5.4	分辨率研究的指导作用	69
2.5.5	结论	72
2.6	基于射线理论的格林函数计算	73
2.6.1	运动学射线追踪计算格林函数	73
2.6.2	动力学射线追踪计算格林函数	75

第3章 地震层析成像在表层速度结构反演中的应用	81
3.1 初至波走时层析成像对初始模型的依赖性	81
3.1.1 引言	81
3.1.2 数值实验及结果分析	82
3.1.3 初始模型选取策略	89
3.1.4 理论模型实验	90
3.1.5 实际资料处理	94
3.1.6 小结	96
3.2 地震层析成像中的正则化方法	97
3.2.1 走时层析的阻尼最小二乘解	98
3.2.2 外部约束方法	99
3.2.3 正则化方法	99
3.2.4 理论模型试验	103
3.2.5 实际资料处理	105
3.2.6 小结	107
3.3 偏移距加权初至波层析成像	108
3.3.1 MOR 层析反演	108
3.3.2 偏移距加权地震层析成像	112
3.3.3 小结	114
3.4 反射层析中的速度与深度解耦方法	114
3.4.1 解耦方法	115
3.4.2 理论模型实验	116
3.4.3 小结	118
3.5 反射、初至联合层析成像反演表层速度结构	119
3.5.1 反射层析与初至层析	120