



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书

SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

探地雷达有限元正演及介电 参数反演

GROUND PENETRATING RADAR FINITE ELEMENT NUMERICAL SIMULATION AND
DIELECTRIC PARAMETER INVERSION

王洪华 戴前伟 冯德山 著

Wang Honghua Dai Qianwei Feng Deshan



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

探地雷达有限元正演及 介电参数反演

GROUND PENETRATING RADAR FINITE ELEMENT NUMERICAL
SIMULATION AND DIELECTRIC PARAMETER INVERSION

王洪华 戴前伟 冯德山 著
Wang Honghua Dai Qianwei Feng Deshan



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

探地雷达有限元正演及介电参数反演/王洪华,戴前伟等著.
—长沙:中南大学出版社,2016.1
ISBN 978-7-5487-2270-0

I. 探... II. ①王... ②戴... III. 探地雷达-有限元法-研究
IV. TN959.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 099484 号

探地雷达有限元正演及介电参数反演

TANDI LEIDA YOUXIANYUAN ZHENGYAN JI JIEDIAN CANSHU FANYAN

王洪华 戴前伟 冯德山 著

☐责任编辑 刘石年 胡业民

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙鸿和印务有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 12 ☐字数 236 千字

☐版 次 2016 年 1 月第 1 版 ☐印次 2016 年 1 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2270-0

☐定 价 60.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书在回顾探地雷达(GPR)正演及反演研究现状的基础上,对有限单元法应用于探地雷达在常规介质,频散、随机和各向异性等特殊介质中的观测数据正演及介电参数反演进行了理论研究。分析了电磁波在常规、频散、随机和各向异性介质中的传播特征及异常体回波特征。研究了层状介质阵列天线探地雷达共中心点数据的速度分析方法及全波形反演技术,建立了相应的层状介质电磁波速度及介电参数反演流程,对今后探地雷达正演及介电参数反演的深入研究提供了可借鉴的经验。

本书可供从事探地雷达正反演及应用领域的相关研究人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考用书。

作者简介

About the Author

王洪华，男，汉族，博士。1986年10月出生于江西省莲花县，现为桂林理工大学地球科学学院讲师。2015年毕业于中南大学，获地球探测与信息技术工学博士学位，攻博期间，于2013—2014年被选送日本东北大学做联合培养博士，主要从事探地雷达数值模拟及数据处理研究。博士学习期间，主持中南大学研究生科研创新项目1项(2013zzts053)，参加与探地雷达相关的国家自然科学基金3项(41574116, 41374118, 41074085)。已发表学术论文10余篇，其中被SCI收录2篇，被EI收录4篇。

戴前伟，男，汉族，博士，教授，博士生导师。1968年7月出生于湖南省涟源市，1987—1991年就读于原中南工业大学地质系，获应用地球物理专业学士学位，1991—1997年硕博连读获中南工业大学应用地球物理专业博士学位，日本东北大学高级访问学者。1997年留任中南工业大学教学，2005年晋升教授，2006年被评为博士生导师。先后担任中南大学地球物理勘察新技术研究所副所长、所长、中南大学信息物理工程学院党委副书记。现为中南大学地球科学与信息物理学院党委书记、国务院学位委员会地质资源与地质工程学科评议组成员、《工程勘察》编委、湖南省地球物理学会副理事长、中国地球物理学会理事。主要从事电磁法勘探理论与应用、工程与环境地球物理的教学科研工作。近年来主持国家“863”计划课题1项，国家“十一五”科技支撑计划课题1项，国家自然科学基金项目1项，省部级课题5项，校企横向科研合作项目20多项，参与以上各类项目30多项。参与撰写专著3部，获省部级奖4项，发表学术论文90多篇，其中被EI、SCI收录30余篇。

冯德山,教授,男,博士,教授,博士生导师。中南大学地球科学与信息物理学院应用地球物理系主任、湖南省地球物理学会副秘书长,国家自然科学基金评审专家,湖南省及浙江省自然科学基金评审专家。2012 年入选教育部新世纪优秀人才、升华育英优秀人才支持计划项目、湖南省普通高校青年骨干教师。主要从事地球物理数据处理、正演模拟与反演成像、小波分析等理论与方法研究,尤其是在探地雷达的数值模拟及偏移处理方面取得了一定的成果积累。已发表专业论文 60 余篇,其中被 SCI 收录 8 篇、被 EI 收录 19 篇、被 ISTP 收录 2 篇;主持国家自然科学基金项目 3 项(41574116, 41074085, 40804027),主持完成湖南省自然科学基金重点项目(09JJ3084)1 项,教育部高等学校博士学科专项科研基金新教师基金项目(200805331082)1 项,湖南省科技计划项目(2008TP4013-2)1 项,参与完成国家十一五科技支撑计划项目 2 项(2006BAC07B00-2, 2007BAK24B02)。2011 年获得了中南大学西南铝优秀教师奖及 2011 年本科教学优秀质量奖,获得中国有色金属科技一等奖 1 次,以第一完成人获得软件著作权 2 项。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础,是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国,我国在有色金属研究领域,特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速,产量连年来居世界首位,有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时,有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出,对国外资源的依赖程度逐年增加,严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展,已探明的优质矿产资源接近枯竭,不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机,而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后,对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版,对于提高我国有色金属工业的自主创新能力,促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用,确保我国有色金属产业的可持续发展,具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目,《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版 100 种图书,涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立,用于鼓励和支持优秀公益性出版项目,代表我国学术出版的最高水平。《有色金属理论与技术前沿丛书》瞄准有色金属研究发展前沿,把握国内外有色金属学科的最新动态,全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用,发掘与采集极富价值的研究成果,具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版,在《有色金属理论与技术前沿丛书》的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作,大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版,对高等院校、科研院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

探地雷达(GPR)作为一种对地壳浅部进行地球物理勘探的重要新技术,已广泛应用于水文、工程、环境、考古等领域,解决了很多工程实际问题。近年来,随着工程应用领域的快速扩展,GPR理论也得到了很大的发展,但其实测资料的解释仍以定性为主,要实现从定性解释到定量解释的质的飞跃,目前的探地雷达正反演技术还有待深入研究。

有限单元法作为一种高精度的正演算法,可利用非规则网格精确离散复杂地电结构,是目前电磁场领域应用最广泛的数值计算方法。GPR反演是实现将观测资料从定性解释到定量解释的可行手段,也是该领域的研究热点。

本书主要研究了GPR在常规介质及频散、随机和各向异性等特殊介质中的有限元正演算法、共中心点数据速度谱分析方法及全波形反演技术,分析了电磁波在各种介质中的传播特征和异常体回波特征,并建立了相应的介质电磁波速度及介电参数反演算法及流程。

全书共分为7章:第1章绪论部分介绍了相关研究的背景和进展;第2章从GPR的基本理论和电磁波传播的基本规律入手,介绍了有限单元法在GPR于常规介质中正演的流程,推导常规介质中的GPR有限元方程及其中心差分法求解公式,比较了透射边界条件、Sarma边界条件及各向异性完全匹配层边界条件的吸收效果,开展GPR二、三维正演模拟;第3章在介绍了频散、随机和各向异性介质基本概念的基础上,分别推导了频散、随机和各向异性介质的GPR有限元方程,并开展一些模型正演计算,分析了电磁波在这

些特殊介质中的传播规律及异常体的反射回波特征；第4章从GPR天线阵列系统、共中心点数据速度谱分析方法两方面入手，开展了常规、频散、随机、各向异性介质正演数据的速度谱分析研究，并通过模型试验验证了该方法的正确性和可行性，最后利用该技术应用于实测数据的反演解释中，实现了在地下二维介质中速度的反演；第5章介绍了GPR全波形反演的概念，并给出了阻尼最小二乘法全波形反演算法的详细流程，在此基础上，开展了正演和实测数据的反演，验证了反演算法的正确性和可行性；第6章是结论，对本书的主要研究成果和创新点进行了总结，对有限单元法、共中心点数据速度谱分析和阻尼最小二乘法分别在GPR正演和反演领域中的研究方向进行了分析和展望。

本书得到了国家自然科学基金项目(41574116, 41374118, 41074085, 40804027, 41164004)、教育部博士点基金项目(20120162110015)和国家公派留学基金的联合资助。中南大学的柳建新教授、熊章强教授、鲁光银教授，厦门大学的刘海助理教授对本书提出了许多宝贵的建议，在这里谨向他们表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，敬请广大读者给予批评指正。

编 者

2016年3月

1 绪论	1
1.1 研究的目的是和意义	1
1.2 GPR 正演模拟研究现状	2
1.3 GPR 反演研究现状	4
1.3.1 地下介质电磁波速度分析方法研究现状	4
1.3.2 GPR 介电参数反演研究现状	5
1.4 本书章节安排和主要研究工作	6
2 常规介质的 GPR 有限元正演模拟	8
2.1 电磁波传播的基本规律	8
2.1.1 Maxwell 方程组	8
2.1.2 本构关系	8
2.1.3 GPR 波动方程	9
2.2 GPR 波动方程二维有限元求解	10
2.2.1 伽辽金法推导 GPR 二维有限元方程	10
2.2.2 中心差分法求解 GPR 二维有限元方程	14
2.2.3 中心差分法的数值稳定性条件	16
2.3 GPR 有限元正演模拟中的 UPML 边界条件	16
2.3.1 UPML 边界条件	17
2.3.2 UPML 与传统吸收边界条件的吸收效果对比	20
2.4 GPR 二维有限元正演模拟实例	28
2.4.1 起伏界面模型	28
2.4.2 “V”字形模型	30
2.4.3 三圆模型	31
2.4.4 两层起伏地形模型	33
2.5 GPR 波动方程三维有限元求解	34

2 / 探地雷达有限元正演及介电参数反演	
2.5.1 伽辽金法推导 GPR 三维有限元方程	34
2.5.2 GPR 三维有限元正演模拟实例	38
2.6 本章小结	41
3 特殊介质的 GPR 有限元正演模拟	42
3.1 频散介质的 GPR 有限元正演模拟	42
3.1.1 频散介质模型	42
3.1.2 频散介质中 GPR 波动方程	45
3.1.3 频散介质的 GPR 有限元正演模拟算法	46
3.2 频散介质的 GPR 有限元正演模拟实例	51
3.2.1 均匀频散介质模型	51
3.2.2 半非频散半频散介质模型	53
3.2.3 两圆异常体频散介质模型	57
3.3 随机介质模型	58
3.4 随机介质的 GPR 有限元正演模拟实例	62
3.4.1 半均质半随机介质模型	62
3.4.2 含矩形异常体随机介质模型	66
3.5 各向异性介质的 GPR 有限元正演模拟	70
3.5.1 各向异性介质模型	70
3.5.2 各向异性介质中 GPR 波动方程	71
3.5.3 各向异性介质的 GPR 有限元正演模拟算法	73
3.6 各向异性介质的 GPR 有限元正演模拟实例	76
3.6.1 均匀各向异性介质模型	77
3.6.2 半各向同性半各向异性介质模型	84
3.6.3 矩形异常体各向异性介质模型	87
3.7 圆形异常体在三种特殊介质中正演结果对比	94
3.8 本章小结	98
4 基于阵列天线观测的 GPR 数据 CMP 速度分析	99
4.1 阵列天线观测方法原理	99
4.1.1 阵列天线系统	99
4.1.2 阵列天线系统的 CMP 数据提取方法	100
4.2 CMP 速度分析方法	102
4.2.1 CMP 测量原理	102
4.2.2 CMP 数据处理	103

4.2.3	CMP 速度谱计算	110
4.2.4	CMP 速度分析方法的正确性和可行性验证	112
4.3	特殊介质正演数据的 CMP 速度分析	115
4.3.1	频散介质	115
4.3.2	随机介质	118
4.3.3	各向异性介质	120
4.4	阵列天线观测数据的 CMP 速度分析	123
4.4.1	沙层阵列天线观测及 CMP 速度分析	123
4.4.2	海啸层阵列天线观测及 CMP 速度分析	129
4.5	本章小结	137
5	GPR 阻尼最小二乘法全波形反演	139
5.1	GPR 阻尼最小二乘法全波形反演算法	139
5.1.1	反演方程组的推导	140
5.1.2	差分法雅克比矩阵的求解	142
5.1.3	奇异值分解法求解反演方程组	142
5.2	正演数据的 GPR 全波形反演	144
5.2.1	两层介质模型	144
5.2.2	倾斜界面模型	151
5.3	实测数据的 GPR 全波形反演	155
5.3.1	实测 GPR 数据的采集及 CMP 速度分析	155
5.3.2	GPR 实测数据的全波形反演	158
5.4	本章小结	161
6	总结	163
6.1	主要研究成果及创新点	163
6.2	不足之处及今后的研究工作	164
	参考文献	165

1 绪论

1.1 研究的目的和意义

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是根据高频脉冲电磁波在地下不同物性介质之间的反射及绕射等波动规律,来探测地下结构和特性的地球物理方法^[1,2]。近几年来,GPR以其操作简单、分辨率高,无损等优点被广泛应用于工程勘察^[3,4]、无损检测^[5-7]等众多领域,表现出强劲的生命力和广阔的应用前景。

自20世纪90年代以来,随着计算机和电子技术的高速发展,GPR在理论^[8]、仪器设备^[9]、测量方法^[10]、数据处理^[11]、反演技术^[12]等方面都得到了很大的发展,但与对GPR工程检测的日益细化、高精度和高分辨率的客观要求^[13]相比仍存在不少差距。

目前,GPR正演大都采用有限差分法(Finite different time domain, FDTD),采用规则的矩形、立方体网格对模型进行离散化,当它用于简单规则模型计算时,具有模型离散误差小、计算精度高的优势。然而,随着GPR正演及逆时偏移日益细化、复杂化的发展趋势,若采用上述规则网格对复杂结构进行离散会产生较大的离散误差,降低求解精度。传统算法基于均匀网格剖分,需要采用统一的精细网格以减少模型离散误差,这直接导致网格和节点数目急剧增大,计算效率降低。此外,目前GPR实测资料的解释仍主要依靠常规介质的正演模拟结果。然而,GPR探测的对象是实际地下介质,一般都具有频散、各向异性、随机分布等特殊性质,电磁波在这些介质中传播会发生畸变和衰减^[14],若仍沿用常规介质的正演模拟结果对实测GPR资料进行解释,易产生不合理的结果。另外,目前对GPR实测资料的解释主要依靠人工判断与经验解释,以定性为主。GPR反演是实现实测资料从定性分析到定量解释的可行手段^[15],通过反演能够获得地下介质的真实介电参数及几何参数分布,为分析地下结构及其物理特性奠定良好的基础。

因此,开展GPR有限元正演,全面认识电磁波在特殊介质中的传播规律和异常体回波特征;研究GPR实测数据反演技术,准确获得地下介质的介电参数及几何参数分布,对提高实测资料的解释水平有着重要的意义,同时也有助于推动GPR探测技术的快速发展。

1.2 GPR 正演模拟研究现状

GPR 正演模拟是分析探测问题、研究电磁波在地下介质中传播规律的有效手段^[16]。通过正演模拟可以获得异常体在雷达剖面上的反射波形态,加深对雷达实测剖面的理解和认识。GPR 正演模拟方法主要分为两类:射线追踪法和波动方程法。射线追踪法是较早应用于 GPR 正演模拟的数值计算方法^[17, 18],其基本原理是将波动理论简化为射线理论,这种方法的优点是运算方便,计算效率高,缺点是只考虑了电磁波的运动学信息,缺少动力学信息,难以计算介质物性参数变化强烈的地电结构,已很少用于 GPR 正演模拟。

波动方程法从 GPR 满足的波动方程出发,利用数学上成熟的偏微分方程理论去求解 GPR 波动方程^[19]。因此,波动方程法计算得到的波场中既含有电磁波传播的动力学信息,又有运动学信息,为研究电磁波的传播机理和复杂地电结构的解释提供了更多的佐证^[20],所以波动方程法一直在 GPR 正演模拟中占据着主要地位。目前应用于 GPR 正演模拟的波动方程法有许多:Teixeira(1998)等^[21]采用时域有限差分法(Finite difference time domain, FDTD)模拟了电磁波在频散土壤中的传播,并与实验结果进行了对比,验证了 FDTD 能够有效地用于模拟电磁波在频散介质中的传播;Liu(1999)等^[22]采用快速傅里叶变换来代替电磁场的空间导数,提出了一种计算频散介质的伪谱时间域有限差分法(Pseudospectral time domain, PSFD),并通过正演计算论证了该算法在计算大尺度问题上的可行性和有效性;成杏梅(2003)等^[23]利用滤波算法和傅里叶变换,实现了层状介质的 GPR 积分方程法正演模拟,并与 FDTD 的正演结果进行了对比,验证了该算法的正确性;Lu(2005)等^[24]应用基于 PML 吸收边界条件的间断时间域 Galerkin 法实现了频散介质的 GPR 正演;冯德山(2007)等^[25]详细推导了小波多分辨(DB2 - MRTD)算法的 GPR 三维时域有限差分公式,并采用小波多分辨算法进行了 GPR 三维正演模拟及偏移处理,减弱了数值色散及稳定性条件的限制,提高了三维正演计算速度,为 GPR 正演提供了一个新的思路;吴丰收(2009)等^[26]详细推导了高阶 FDTD 的差分格式,并对一系列复杂的 GPR 地电模型进行了正演计算,论证了高阶 FDTD 用于 GPR 正演具有较高精度;Millington 和 Cassidy(2010)^[27]采用基于 GPU 处理器的 FDTD 并行算法,实现了三维大尺度问题的正演计算;冯德山(2010)等^[28]采用交替方向隐式有限差分法(ADI - FDTD)实现了 GPR 正演,突破了 CFL 条件的约束,论证了该算法具有无条件稳定性的优点;方宏远(2013)^[29]采用一种保持 Hamilton 系统总能量不变的辛算法实现了 GPR 二维正演,并与 FDTD 正演结果进行了对比,结果表明在同等计算精度条件下,辛算法可以节约计算时间;冯德山(2013)等^[30]将只需节点无需单元的无网格 Galerkin 算法应用