



中南大学地球科学学术文库

Academic Library of Geosciences  
in Central South University

# 探地雷达数值模拟与偏移成像 的旋转交错网格FDM算法

张彬 戴前伟 冯德山◎著



中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

张彬

中南大学地球科学学术文库  
中南大学地球科学与信息物理学院 组织编撰

# 探地雷达数值模拟与偏移成像 的旋转交错网格 FDM 算法

ROTATED STAGGERED GRID FDM ALGORITHM FOR  
GPR SIMULATION AND MIGRATION IMAGING

张 彬 戴前伟 冯德山 著  
Zhang Bin Dai Qianwei Feng Deshan

---

有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室  
有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室

联合资助

---



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

· 长 沙 ·

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

探地雷达数值模拟与偏移成像的旋转交错网格 FDM 算法 / 张彬, 戴前伟, 冯德山著. --长沙: 中南大学出版社, 2018. 11

ISBN 978 - 7 - 5487 - 3258 - 7

I. ①探… II. ①张… ②戴… ③冯… III. ①探地雷达—数值模拟—网格计算—研究 IV. ①TN959. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 108578 号

---

探地雷达数值模拟与偏移成像的旋转交错网格 FDM 算法

TANDI LEIDA SHUZHI MONI YU PIANYI CHENGXIANG DE  
XUANZHUAN JIAOCUO WANGGE FDM SUANFA

张彬 戴前伟 冯德山 著

---

责任编辑 刘小沛

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 - 88876482

印 装 长沙超峰印刷有限公司

---

开 本 720 × 1000 1/16 印张 10.25 字数 210千字

版 次 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3258 - 7

定 价 65.00 元

---



# 内容简介

Introduction

本书阐述了探地雷达(GPR)标准交错网格及旋转交错网格(RSG)正演模拟及偏移成像的研究现状及发展趋势,开展了旋转交错网格有限差分(FDM)算法的理论研究与在探地雷达正演及偏移中的应用研究,系统地论述了旋转交错网格有限差分(FDM)算法的基本理论。包括RSG算法的数值稳定性和正确性验算、标准交错网格FDM正演、旋转交错网格FDM正演、UCPML吸收边界条件与RSG的融合算法、FDM逆时偏移、线性变换差分逆时偏移、RSG差分逆时偏移,并以水利工程、隧道工程和市政工程三类典型的GPR偏移成像案例开展实验研究,以期提高复杂变速介质和强衰减频散介质中GPR的成像精度,促进复杂介质中GPR三维偏移及全波形多参数反演技术的进一步发展。

本书可供从事探地雷达数值模拟、偏移成像及试验检测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

张彬男，汉族，博士。1984年11月出生于湖南新宁，2016年毕业于中南大学，获地球探测与信息技术工学博士学位，现为中南大学地球科学与信息物理学院博士后，主要从事电磁法数值模拟与反演成像、近地表地球物理数据分析及无损试验检测等理论与方法的研究。主持国家自然科学基金项目1项(41704128)，主持完成中央高校基本科研业务专项项目1项(2014ZZTS048)。作为主要人员参加与探地雷达相关的国家自然科学基金2项(40804027、41574116)，湖南省自然科学基金1项(2017JJ2315)，中国铁路总公司科技计划重点项目1项(2014G005-B)，湖南省交通科技计划1项(201423)，湖南省住房建设科技计划2项(BZ201408、BZ201411)。在国际权威 Top 期刊 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*、国际重要期刊 *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*、《地球物理学报》等上已发表学术论文 20 余篇，其中被 SCI、EI 收录 10 余篇，获软件著作权 2 项。

戴前伟男，汉族，博士，教授，博士生导师，日本东北大学高级访问学者。1968年7月出生于湖南涟源，1997年获中南大学应用地球物理专业博士学位，2005年晋升教授。先后担任中南大学地球物理勘察新技术研究所所长、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，国务院学位委员会评议组成员，国家自然科学基金评审专家，湖南省自然科学基金评审专家，《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，担任 *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*、《地球物理学报》、《地球科学与环境学报》、《中外公路》等期刊审稿专家。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”课题 1 项，主持国家“十一五”科技支撑计划 1 项，主持国家自然科学基金 1 项，主持省部级课题 5 项，校企横向科研项目 20 余项，参与撰写专著 4 部，获省部级奖 4 项，发表学术论文 90 余篇，其中被 SCI、EI 收录 30 余篇。

冯德山 男，汉族，博士，教授，博士生导师，美国 Rice 大学访问学者。1978 年 9 月出生于湖南祁阳，2006 年获中南大学地球探测与信息物理技术工学博士学位。现为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秘书长，浅地表地球物理专业委员会委员，国家自然科学基金评审专家，浙江省及湖南省自然科学基金评审专家，入选“教育部新世纪优秀人才”“湖南省普通高校青年骨干教师”“湖湘青年英才”“升华育英人才计划”，担任 *Computers & Geosciences* 及《地球物理学报》等期刊审稿专家。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。已发表专业论文 70 余篇，其中被 SCI 收录 20 篇，被 EI 收录 39 篇，获得软件著作权 2 项，参与撰写专著 3 部。主持国家自然科学基金 4 项(41774132、41574116、41074085、40804027)，主持完成湖南省自然科学基金重点项目 1 项(09JJ3084)，教育部高等学校博士学科专项科研基金新教师基金项目 1 项(200805331082)，湖南省科技计划项目 1 项(2008TP4013 - 2)，参与完成国家“十一五”科技支撑计划 2 项(2006BAC07B00 - 2、2007BAK24B02)。获省部级奖项 2 项，获西南铝优秀教师奖 1 次。

# 编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

中南大学地球科学学术文库

## 主任

何继善(中国工程院院士)

## 副主任

鲁安怀(教授,国家“973”项目首席科学家,中南大学地球科学与信息物理学院院长)

戴前伟(教授,中南大学地球科学与信息物理学院党委书记)

## 委员

彭省临	戴塔根	刘石年	奚小双	彭振斌
赵崇斌	柳建新	汤井田	朱建军	刘兴权
吴湘滨	隆威	邹峥嵘	邵拥军	戴吾蛟
赖健清	朱自强	吴玺虹	张术根	刘继顺
曾永年	毛先成	张可能	谷湘平	刘亮明
周晓光	李建中	席振铎	李志伟	冯德山
杨牧	张绍和	邓敏		

# 总序

Preface

中南大学地球科学与信息物理学院具有辉煌的历史、优良的传统与鲜明的特色,在有色金属资源勘查领域享誉海内外。陈国达院士提出的地洼学说(陆内活化)成矿学理论,影响了半个多世纪的大地构造与成矿学研究及找矿勘探实践。何继善院士发明的电磁法系统探测方法与装备,获得了巨大的找矿勘探效益。所倡导与实践的地质学与地球物理学、地质方法与物探技术、大比例尺找矿预测与高精度深部探测的密切结合,形成了品牌效应的“中南找矿模式”。

有色金属属于国家重要的战略资源。有色金属成矿地质作用最为复杂,找矿勘查难度最大。正是有色金属资源宝贵性、成矿特殊性与找矿挑战性,铸就了中南大学地球科学发展的辉煌历史,赋予了找矿勘查工作的鲜明特色。六十多年来,中南大学地球科学研究在地质、物探、测绘、探矿工程、地质灾害和地理信息等领域,在陆内活化成矿作用与找矿勘查、地球物理探测技术与装备制造、深部成矿过程模拟与三维预测、复杂地质工程理论与新技术以及地质灾害监测等研究方向,取得了丰硕的研究成果,做出了巨大的科技贡献,产生了广泛的社会影响。当前,中南大学地球科学研究,瞄准国际发展方向和国家重大需求,立足于我国复杂地质背景下资源勘查与环境地质的理论与方法创新研究,致力于多学科联合开展有色金属资源前沿探索与应用研究,保持与提升在中南大学“地(质)、采(矿)、选(矿)、冶(金)、材(料)”特色与优势学科链中的地位和作用,已发展成为基础坚实、实力雄厚、特色鲜明、国际知名、国内一流的以有色金属资源为主兼顾油气、岩土、地质灾害、环境领域的人才培养基地和科学研究中心。

中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室、有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室,联合资助出版



“中南大学地球科学学术文库”，旨在集中反映中南大学地球科学与信息物理学院近年来取得的系列研究成果。所依托的主要研究机构包括：中南大学地质调查研究院、中南大学资源勘查与环境地质研究院和中南大学长沙大地构造研究所。

本文库内容主要涵盖：继承和发展地洼学说与陆内活化成矿学理论所取得的重要研究进展，开发和应用双频激电仪、伪随机和广域电磁法系统所取得的重要研究成果，开拓和利用多元信息找矿预测与隐伏矿大比例尺定位预测所取得的重要找矿成果，探明和研发深部“第二勘查空间”成矿过程模拟与三维定量预测方法所取得的重要研究成果，预警和防治复杂地质工程与矿山地质灾害所取得的重要技术成果。本文库中提出了有色金属资源勘查理论、方法、技术和装备一体化的系统研究成果，展示了多项突破性、范例式、可推广的找矿勘查实例。本文库对于有色金属资源预测、地质矿产勘探、地质环境监测、地质灾害探查以及地质工程预防，特别对于有色金属深部资源从形成规律到分布规律理论与应用的研究，具有重要的借鉴作用和参考价值。

感谢中南大学出版社为策划和出版该文库所给予的大力支持。感谢何继善先生热情指导和题词。希望广大读者对本文库专著中存在的不足和错误提出宝贵的意见，使“中南大学地球科学学术文库”更加完善。

是为序。



2016年10月

# 前言

Foreword

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是利用宽频带高频率电磁波脉冲的反射来探测地下介质结构和特性的重要的地球物理方法,利用电磁波在地下介质中的传播路径、电磁场强度、反射振幅、频谱特征、双程走时等参数来推断介质的结构、空间位置、形态等信息,已广泛应用于浅层地质勘查和工程试验检测的诸多领域。尽管探地雷达方法可以借鉴地震波数据处理技术,但对于复杂的变速介质或强衰减频散介质而言,电磁波的传播机制与地震波具有较大区别,复杂介质中 GPR 的解译结果与真实的地下介质情况存在较大差距,难以满足浅层精细勘探和工程试验检测的高精度要求。因此,深入开展 GPR 正演数值模拟和偏移成像技术研究,研究更稳定、更高效、更精确的 GPR 信号处理技术,利用正演技术来模拟复杂地质介质中雷达波的传播规律和波场特征,利用偏移技术来实现复杂介质的快速精确成像,将提高复杂介质中 GPR 数据的解译水平和反演精度。

本书阐述了基于旋转交错网格(rotated staggered grid, RSG)差分技术的 GPR 正演模拟和偏移成像基本理论,包括标准交错网格(standard staggered grid, SSG)时域有限差分(finite difference method, FDM)正演算法、RSG 时域 FDM 正演算法、FDM 逆时偏移算法、线性变换差分逆时偏移算法、RSG 差分逆时偏移算法,并以几类典型的 GPR 成像难题为案例进行实验研究,以提高复杂介质和强衰减介质中 GPR 的成像分辨率,促进复杂介质中 GPR 信号处理技术的发展。

全书共分为 6 章:第 1 章介绍了相关研究背景、研究现状及进展情况;第 2 章介绍了标准交错网格 FDM 算法的基本理论,导出了二维和三维 GPR 数值模拟的 SSG 时域 FDM 更新方程组、数

值色散及 CFL 稳定性条件,给出了几类常见的时域 FDM 激励源波形,介绍了 SSG 时域 FDM 算法的 GPR 正演实现流程,开展了 GPR 正演模拟实验,比较了 PML、UPML 和 UCPML 吸收边界条件的吸收效果、时频域反射误差等。第 3 章介绍了 RSG 算法的基本理论,包括 RSG 算法的空间网格交错策略、RSG 差分格式和 RSG 时域 FDM 算法的实现流程,介绍了 UCPML 吸收边界条件与 RSG 时域 FDM 算法的融合,开展了低截断 GPR 数值模拟试验,分析了 RSG 时域 FDM 算法的正确性、计算效率、计算精度和吸收效果。第 4 章阐述了 Kirchhoff 偏移法、频率波数域偏移法、 $45^\circ$  方程的 FDM 逆时偏移法和交叉微分算子的线性变换 FDM 逆时偏移法的基本原理和偏移效果,开展了 RSG 算法的偏移成像研究,给出了 RSG 偏移技术的波场延拓公式及稳定性条件,开展了 GPR 偏移成像实验,分析比较了五类偏移算法的偏移成像效果。第 5 章开展了 GPR 介电参数数值试验及实验 GPR 数据的 RSG 偏移成像研究,给出了复杂介质中多介电参数与波速之间相关关系的分段拟合曲面,验算了 RSG 逆时偏移方法对低、中、高三类 GPR 电磁波频率的偏移效果,以提高复杂介质的成像分辨率及浅层地表 GPR 检测精度。第 6 章为总结,对本书的主要研究成果和创新点进行了总结,对 RSG 时域 FDM 算法的 GPR 正演及偏移理论的研究方向进行了分析和展望。

本书得到国家自然科学基金(41704128、41774132、41374118)、湖南省自然科学基金(2018JJ3636、2017JJ2315)、湖南省交通科技计划(201423)、湖南省住房建设科技计划(BZ201408、BZ201411)、中国博士后科学基金、中南大学博士后基金(2018M632992)、中南大学地球科学学术文库出版基金的联合资助。湖南大学的王玲教授,煤炭科学研究总院的吴燕清研究员,中南大学的柳建新教授、熊章强教授、严家斌教授、刘海飞副教授、孙娅副教授,对本书提出了许多宝贵的建议,中南大学出版社的编辑在本书的出版过程中做了大量细致的编辑、校核工作,在此谨向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

张 彬

2018 年 1 月于长沙中南大学

# 目录

Contents

第1章 绪论 .....	(1)
1.1 引言 .....	(1)
1.2 探地雷达信号处理技术国内外研究进展及发展趋势 .....	(2)
1.2.1 探地雷达正演数值模拟的研究进展 .....	(2)
1.2.2 探地雷达偏移成像的研究进展 .....	(5)
1.3 标准交错网格 FDM 算法的研究现状 .....	(7)
1.4 旋转交错网格 FDM 算法的研究现状 .....	(9)
1.5 本书结构及主要工作 .....	(10)
第2章 SSG 时域 FDM 算法正演模拟基本理论 .....	(13)
2.1 SSG 时域 FDM 算法的基本方程 .....	(13)
2.1.1 麦克斯韦时域微分方程 .....	(13)
2.1.2 本构关系 .....	(14)
2.1.3 Yee 氏交错网格 .....	(15)
2.2 交错网格中的三维时域 FDM 方程 .....	(17)
2.3 交错网格中的二维时域 FDM 方程 .....	(19)
2.4 时域 FDM 算法的数值稳定性和色散 .....	(23)
2.4.1 数值稳定性 .....	(23)
2.4.2 数值色散 .....	(26)
2.5 时域 FDM 激励源 .....	(28)
2.6 完全匹配层吸收边界条件 .....	(31)
2.6.1 吸收边界条件的研究进展 .....	(31)
2.6.2 PML 吸收边界条件 .....	(32)
2.6.3 问题空间的分裂场 PML 方程 .....	(35)
2.6.4 非分裂递归卷积完全匹配层 .....	(41)
2.6.5 吸收边界条件数值算例 .....	(48)

2.7	本章小结	(59)
<b>第3章</b>	<b>RSG 时域 FDM 算法正演模拟基本理论</b>	<b>(60)</b>
3.1	RSG 差分格式	(62)
3.1.1	RSG 差分离散	(63)
3.1.2	TMy 极化模式的 RSG 时域 FDM 更新方程	(64)
3.2	RSG 时域 FDM 算法计算流程	(66)
3.3	RSG 算法稳定性和正确性验证	(67)
3.3.1	简单薄层介质地电模型	(68)
3.3.2	复杂非均匀突变介质地电模型	(71)
3.4	非分裂递归卷积完全匹配层吸收边界条件	(74)
3.4.1	TMy 极化模式下场分量的 RSG 差分算子	(74)
3.4.2	RSG 差分离散的 UCPML 吸收边界条件	(75)
3.5	基于 UCPML 的 RSG 算法正演模拟算例	(78)
3.5.1	衰减夹层模型	(78)
3.5.2	色散镶嵌模型	(85)
3.6	本章小结	(92)
<b>第4章</b>	<b>RSG 算法的逆时偏移成像基本理论</b>	<b>(94)</b>
4.1	Kirchhoff 积分偏移	(95)
4.1.1	简谐波的 Kirchhoff 积分公式	(95)
4.1.2	脉冲波的 Kirchhoff 积分公式	(97)
4.2	频率波数域 F-K 偏移	(99)
4.3	差分逆时偏移	(101)
4.3.1	逆时偏移的基本原理	(101)
4.3.2	FDM 逆时偏移	(101)
4.3.3	线性变换差分逆时偏移	(104)
4.3.4	RSG 差分逆时偏移	(108)
4.4	复杂变速介质地电模型正演数据的偏移实例	(110)
4.5	本章小结	(112)

第 5 章 介电参数数值试验与实验数据的 GPR 偏移成像	(114)
5.1 典型钢筋混凝土模型的数值实验	(114)
5.1.1 钢筋混凝土模型的单介电参数数值实验	(114)
5.1.2 钢筋混凝土模型的双介电参数数值实验	(117)
5.1.3 电导率、相对介电常数和波速的相关关系拟合	(118)
5.2 典型复杂介质的 GPR 实验数据的偏移成像	(120)
5.2.1 含富水层的抽水蓄能电站库底渗漏区域 GPR 实验数据	(121)
5.2.2 含双层钢筋网和工字钢的隧道底部 隐蔽病害 GPR 实验数据	(126)
5.2.3 含钢筋框架的综合管廊混凝土隐蔽病害 GPR 实验数据	(129)
5.3 本章小结	(132)
第 6 章 总 结	(134)
6.1 本书主要研究成果及创新点	(134)
6.2 不足之处及今后的研究工作	(135)
参考文献	(136)

# 第1章 绪论

## 1.1 引言

探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 是一种用于确定地下介质分布的广谱 (1 MHz ~ 1 GHz) 电磁技术, 利用发射天线发射高频宽频带电磁波, 接收天线接收来自地下介质界面的反射波<sup>[1]</sup>。根据电磁波在介质中的传播路径、电磁场强度、反射振幅、频谱特征、相位信息、双程走时和波形等参数来推断介质的结构、空间位置、形态和埋藏深度。目前常用的 GPR 工作模式主要有三种, 分别为共偏移距模式、共中心点模式和共深度点模式, 如图 1.1、图 1.2 和图 1.3 所示。

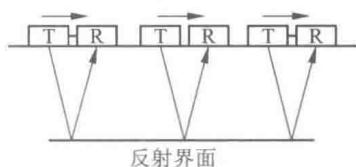


图 1.1 共偏移距 GPR 工作模式

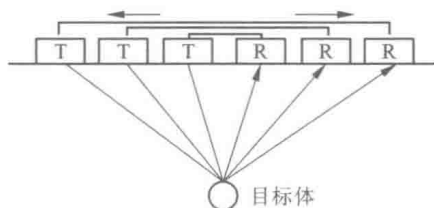


图 1.2 共中心点 GPR 工作模式

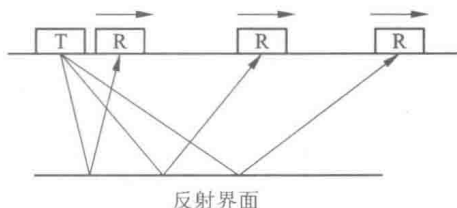


图 1.3 共深度点 GPR 工作模式

由于雷达波具有高频特征, 波长较短, 地下介质具有较强的电磁衰减特性, 加之地面情况具有多样性, 信号干扰较大, 使得 GPR 的初期应用仅限于电磁波吸收和衰减较弱的冰层及岩盐探测。随着计算机技术的飞速发展, GPR 从探测技术到数字处理及资料解释都有了极大的进展, GPR 的实际应用范围迅速扩大, 目前已普遍应用于无损检测、建筑物结构调查、地质工程勘察、考古、军事等领域<sup>[2-6]</sup>, 解决了涉及工程质量、安全施工、国防建设等领域的诸多实际工程问题。

正是依靠其高分辨率的优势, 探地雷达已经成为工程地球物理勘探的重要工具, 尤其对于浅层地球物理探测, 探地雷达已成为指定的高分辨率探测手段, 地

质目标体的体积、产状、电性参数等的精确反演,将准确地监督工程质量,有效地指导安全施工,及时地预防地质灾害发生,对避免经济损失和安全事故具有重要的理论价值和指导意义。

由于探地雷达具有高频特性,在地下介质中以位移电流为主,电磁波传播理论与弹性波的传播理论有许多类似的地方,两者遵循同一形式的波动方程,只是波动方程中变量代表的物理意义不同,正是雷达波与地震波在运动学上的相似性,所以对探地雷达资料处理解释的方法基本是借鉴对地震波处理解释的方法。但是在复杂的各向异性或频散特性介质中,雷达电磁波的传播机制与地震波具有较大的区别,使得 GPR 的数值模拟方法、网格剖面密度、迭代计算效率、波长延拓和偏移成像精度与地震数据信号处理有较大的差别,因此,研究更稳定、更高效、更精确的 GPR 信号处理技术,利用数值模型来模拟复杂地层介质中雷达波的传播规律和波场特征,以及利用偏移技术来实现复杂地层介质的快速成像,将促进复杂介质中 GPR 正演数值模拟及精细化反演解释的发展,为研制新型探地雷达提供技术原型和理论指导,具有较高的理论和实际应用价值。

## 1.2 探地雷达信号处理技术国内外研究进展及发展趋势

### 1.2.1 探地雷达正演数值模拟的研究进展

探地雷达正演数值模拟是分析探测问题、研究雷达波波场传播规律的有效途径,研究雷达电磁波在这些介质中的传播,对提高探测精度和解释的准确性具有重要意义,目前,诸多数值计算方法已成功应用于探地雷达数值模拟中。

射线追踪法以计算速度快、结果直观、计算精度的适应性较强、理论上能够达到任意精度要求等优点,在 GPR 正演模拟中发展迅速,但是该方法的缺点是仅考虑到信号的反射响应,不适用于空气与地面的分界面产生的直达波。邓世坤(1993)<sup>[7]</sup>采用射线追踪法,推导了二次辐射电磁场的二维 GPR 迭代公式,实现了二维 GPR 正演剖面的合成;Goodman(1994)<sup>[8]</sup>开发了基于精确射线追踪技术的 GPR 正演算法,将其应用于文物探测的考古研究,详细记录了沿射线轨迹的雷达波衰减;Cai 和 Mcmechan(1995)<sup>[9]</sup>应用射线追踪法研究了二维 GPR 波的传播规律,并实现了二维 GPR 剖面的快速反演;冯暄和曾昭发等(2014)<sup>[10]</sup>借鉴了地震波的三维逐段迭代射线追踪算法,考虑了雷达波的动力学特征和衰减特性,并详细推导了三维逐段迭代射线追踪算法的计算格式,实现了三层任意界面的三维 GPR 射线追踪数值模拟;李峰(2006)<sup>[11]</sup>基于最短路径的射线追踪算法,开发了基于波前扩展网格的射线追踪算法,解决了任意反射界面的绕射点、反射点及反射路径的确定等问题。



基于麦克斯韦方程组的时域 FDM (finite difference method, FDM) 及其高阶的时域 FDM 已经发展成了一种较成熟的数值模拟方法, 该方法采用标准的正方形或立方体交错网格, 并以网格剖分简单、节约计算时间和存储空间、直接时域范围计算、程序通用性强等优点<sup>[12-13]</sup>, 在模拟雷达波传播中得到了广泛的应用。Teixeira(1998)等<sup>[14]</sup>在完美匹配层吸收边界条件下利用时域 FDM 法对各向异性的良导介质进行了三维 GPR 数值模拟; Gürel 和 Oğuz 等(2000)<sup>[15]</sup>在复杂介质中进行了三维 GPR 数值模拟, 着重考虑了极化方向; 何兵寿等(2000)<sup>[16]</sup>对矿井地电模型进行了 GPR 数值模拟; Giannopoulos(2005)<sup>[17]</sup>编写了基于 Yee 氏正交网格的 GprMax 探地雷达数值模拟软件; 刘四新、曾昭发等(2006)<sup>[18]</sup>基于 Sullivan 理论, 研究了三维频散介质中的探地雷达 FDTD 模拟; 冯德山、戴前伟等(2007)<sup>[19]</sup>研究了基于时域多分辨法的三维 GPR 数值模拟, 采用的小波多分辨算法为 FDTD 数值模拟提供了新的思路; 李静等(2010)<sup>[20]</sup>研究了探地雷达的高阶 FDTD 数值模拟, 提高了复杂介质中 GPR 的模拟精度; 刘新荣等(2010)<sup>[21]</sup>研究了隧道衬砌空洞三维 GPR 正演数值模拟, 为 GPR 图谱的解释提供了有效依据; 傅磊等(2014)<sup>[22]</sup>将 FDTD 算法应用于机载探地雷达的三维数值模拟中, 研究了天线的极化方向、天线的高度和高斯随机粗糙表面对偏移成像的影响。

FDTD 算法将地质模型剖分成规则的正交单元, 对于物性参数差异较大或各向异性特征明显的复杂异常地质体, 为了获取更精确的 FDTD 数值模拟结果, 通常采用更高阶的 FDTD 算法或增加最小波长所占据的空间网格数量, 但无论是隐式还是显式的 FDTD 交错网格差分格式, 均会造成不同程度的数值不稳定性<sup>[23-24]</sup>, 且计算效率受到网格剖分数量的严重影响, 数值模拟精度受到极大制约, 尤其在应对存在诸多各向异性突变点的复杂地质条件下的 GPR 数值模拟中, 诸如含碎石层和钢筋混凝土层路面的路基缺陷探测、复杂地质矿山的浅层采空区勘探、复杂富水介质段的隧道超前地质预报、已施作路面层的隧道仰拱质量缺陷探测、存在多条并行管线的燃气管道爆炸隐患质量探测、含复杂频散介质的浅层地下水探测等, 数值不稳定性更加明显。随着 GPR 探测理论研究的深入, 探测目标体越来越复杂, 雷达波在这些介质中的传播规律和衰减特性越来越复杂, 传统的高阶交错的 FDTD 算法能够实现快速的正演模拟, 但由于其本身的差分格式布局, 使其无法规避严格的 CFL 数值稳定性条件的限制, 导致其在处理这些复杂突变介质时难以获得较好的模拟精度和吸收效果。

为解决这些问题, 国内外学者从雷达电磁波传播特性及复杂介质中的衰减规律出发, 在数值计算方法、网格剖分方式、网格加密形式等方面进行了复杂介质的 GPR 模拟研究。有限元法 (finite element method, FEM) 是目前较普遍的 GPR 数值模拟方法, 该方法将 GPR 麦克斯韦方程变为等价的变分方程, 在计算区域内的单元上构造分域基函数, 并在单元局部进行近似来求解 GPR 波长分量。沈飏等