

探地雷达

正反演理论与信号处理

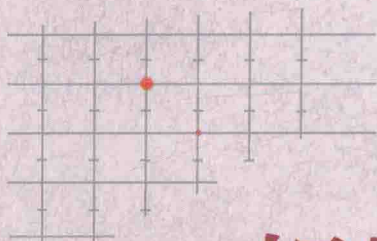
Tandi Leida Zhengfanyan
Lilun Yu Xinhao Chuli

舒志乐 刘保县 刘新荣 朱成红 著



科学出版社

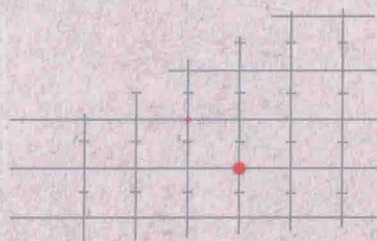
(TU-1524.0101)



探地雷达

正反演理论与信号处理

Tandi Leida Zhengfanyan Lilun Yu Xinhao Chuli



科学出版社互联网入口
成都分社 电话: (028) 85230758
E-mail: chenjiecd@mail.sciencep.com
销售分类建议: 地质学

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-052122-4



定价: 78.00元

探地雷达正反演理论与信号处理

舒志乐 刘保县 刘新荣 朱成红 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

探地雷达具有无损、高效、抗干扰能力强、操作方便、成本低、受检测条件限制小和检测精度高的特点,自1970年美国生产出第一台商用雷达起,国内外学者或公司便根据各自的研究目标,对其开展了广泛的开发和应用研究。本书详细介绍探地雷达的有关基本理论、数据处理方法、正反演理论、资料解释流程和方法以及典型工程应用。本书共分为8章,主要内容包括探地雷达的物理模型试验、探地雷达的正反演理论及程序实现、资料处理与解释和工程应用,并提出二、三维联合检测技术。本书题材大多来自科研和工程实践,注重理论与实践相结合,在内容安排上注重理论的系统性并兼顾各类工程实际。

本书可供高等院校土木工程、交通工程、矿业工程、隧道工程、道路工程、市政工程等领域的科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

探地雷达正反演理论与信号处理 / 舒志乐等著. —北京:科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-052122-4

I. ①探… II. ①舒… III. ①探地雷达-雷达信号处理 IV. ①TN959.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 052492 号

责任编辑: 张 展 陈 杰 / 责任校对: 陈 靖

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年3月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 210千字

定价: 78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

探地雷达是利用高频脉冲电磁波在地下介质中的传播特性及遇到异常介质时的反射和绕射等波动规律,来探测地下目标体分布形态与特征的一种地球物理方法。20世纪70年代后,随着电子技术的发展和先进数据处理技术的应用,探地雷达的应用从冰层、盐矿等弱耗介质逐渐扩展到土层、煤层以及岩层等有耗介质,探地雷达的实际应用范围迅速扩大,现已覆盖考古、矿产资源勘探、灾害地质勘查、工程质量检测、工程建筑物结构调查和军事探测等众多领域,并开发了地面、钻孔与航空卫星上应用的探地雷达系统。

在我国,1994年李大心教授编著了《探地雷达方法与应用》,为推动探地雷达在我国的发展和应用奠定了坚实的基础。经过二十多年的发展,探地雷达取得了丰硕成果,但目前在隧道超前预报和质量检测上基本都是应用二维技术,无法定量确定病害的分布范围;在信号处理方面,虽然探地雷达高频脉冲电磁波在介质中运动学规律与地震波有相似性,但传播机制有较大区别,雷达波频率高、波长短、介质吸收强烈,使得经常滤波处理后隧道衬砌内奇异性分布、奇异点位置所在和奇异程度不突出,边沿信息较模糊;在反演和解释方面,由于隧道现场环境的复杂性、检测表面的不平整性以及各类干扰的存在,势必造成采集数据的质量下降,有效信号不突出,从而给雷达资料的处理和解释带来困难,极易造成错误解释。因此探讨提高成像质量、目标识别精度、分辨率及应用效果的正反演和信号处理新理论、新技术和新方法,对提高隧道衬砌检测解释的直观性和准确性具有重要的理论意义和实际应用价值。

本书是在充分吸收国内外研究成果的基础上,由西华大学舒志乐、刘保县,重庆大学刘新荣,中国长江三峡集团公司朱成红撰写而成。在作者进行探地雷达的研究和本书的撰写过程中,中南大学冯德山教授、北京鑫衡运科贸有限责任公司李林林、白雪冰、张国锋给予了诸多帮助和指导,在此表示衷心感谢!书中难免有不妥或错误之处,敬请专家批评指正。

目 录

1 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 探地雷达技术国内外研究现状	2
1.2.1 探测雷达正演研究现状	3
1.2.2 探地雷达偏移技术研究现状	4
1.2.3 探地雷达信号滤波研究现状	7
1.2.4 探地雷达反演研究现状	8
1.2.5 探地雷达在隧道衬砌检测中的应用现状	9
1.3 本书内容安排	10
2 空洞物理模型探地雷达探测	11
2.1 探地雷达基本理论	11
2.1.1 波动方程	11
2.1.2 平面电磁波在无耗介质中的传播	12
2.1.3 平面电磁波在有耗介质中的传播	13
2.1.4 平面波在介质分界面的反射和透射	14
2.2 试验探测方法和探测仪器	15
2.2.1 探测方法	15
2.2.2 试验仪器	16
2.2.3 RAMAC ProEx 系统的性能指标和技术参数	17
2.3 RAMAC ProEx 系统的数据采集及处理软件	18
2.3.1 Groundvision 2 数据采集软件	18
2.3.2 REFLEXW 数据处理软件	19
2.3.3 EASY-3D 软件	20
2.4 探地雷达图像解释	21
2.4.1 单道波形图解释	21
2.4.2 时间-深度剖面图解释	21
2.4.3 2D 剖面 and 3D 立体图解释	22
2.5 空洞物理模型试验设计与测试	22
2.5.1 模型边界对探地雷达数据采集的影响	23
2.5.2 空洞模型设计与制作	23

2.5.3	空洞模型试验方案	24
2.5.4	模型介质探地雷达电磁波速度测定	25
2.6	测试数据常规处理解释与可视化	25
2.6.1	空洞模型二维测试图谱特征	26
2.6.2	空洞模型三维测试可视化及图谱特征	28
2.7	圆形空洞物理模型试验	33
2.8	隧道衬砌探地雷达三维探测合理测线间距探讨	35
3	探地雷达常规数据处理方法	38
3.1	探地雷达数据显示形式	38
3.2	探地雷达常规数据处理方法	40
3.2.1	数据预处理	40
3.2.2	一维频率域滤波	44
3.3	频率波数域滤波	51
3.4	预测反褶积压制多次波	53
4	合成孔径探地雷达(SAR)成像技术	61
4.1	探地雷达波速的测定	62
4.2	F-K 偏移成像	62
4.2.1	F-K 偏移成像算法原理	63
4.2.2	F-K 偏移成像技术的实现	64
5	探地雷达信号平衡多小波变换滤波技术	67
5.1	多小波的多分辨率分析	67
5.1.1	多尺度函数	68
5.1.2	多小波函数	68
5.2	CL4 多小波构造与性质	69
5.2.1	CL4 多小波构造	69
5.2.2	多小波的性质	72
5.3	CL4 多小波变换	72
5.3.1	CL4 多小波的分解算法	72
5.3.2	CL4 多小波的重构算法	74
5.3.3	CL4 多小波预处理的必要性及平衡化	75
5.3.4	边界处理方法	78
5.4	CL4 平衡多小波阈值滤波算法	78
5.4.1	多小波滤波的基本原理	79
5.4.2	多小波阈值滤波方法	80
5.4.3	探地雷达信号滤波算法实现	82
5.5	探地雷达信号多小波阈值滤波效果与分析	83

6 隧道衬砌内空洞探地雷达 FDTD 法正演模拟	85
6.1 FDTD 法的基本原理	85
6.1.1 Maxwell 方程组	85
6.1.2 Yee 元胞	86
6.1.3 二维空间 TM 波 FDTD 方程	87
6.1.4 三维空间 FDTD 方程	88
6.2 FDTD 法解的稳定性和数值色散	89
6.2.1 Courant 稳定性条件	89
6.2.2 FDTD 法数值色散	90
6.3 UPML 吸收边界条件	91
6.3.1 三维导电介质 UPML 吸收边界	91
6.3.2 二维导电介质 UPML 吸收边界	99
6.3.3 UPML 吸收边界的参数设置	102
6.4 RAMAC 探地雷达数据存储和写入	103
6.4.1 RAMAC 系统数据存储格式	104
6.4.2 RAMAC 雷达数据 MATLAB 读写实现	105
6.5 FDTD 算法计算机程序实现	106
6.5.1 激励源的类型和设置	106
6.5.2 FDTD 法数值模拟计算流程	107
6.6 探地雷达 FDTD 法二、三维空洞模型正演模拟	109
6.6.1 二维空洞模型正演模拟	109
6.6.2 三维空洞模型正演模拟	116
7 探地雷达探测遗传算法正则化反演	118
7.1 探地雷达反演的数学物理模型	118
7.1.1 探地雷达反演问题的一般格式	118
7.1.2 二维 TM 波介电常数反演模型	120
7.1.3 探地雷达反演模型的数学适定性	121
7.2 Tikhonov 正则化方法	122
7.2.1 不适定问题的正则化	122
7.2.2 Tikhonov 正则化原理	122
7.2.3 探地雷达探测正则化反演目标函数构制	123
7.3 实数编码遗传算法基本原理与方法	123
7.3.1 遗传算法的基本原理	124
7.3.2 实数编码方法	125
7.3.3 遗传算法的实现技术	126
7.4 实数编码遗传算法反演的计算机程序实现	131
7.5 空洞模型介电常数反演结果与分析	132

8 探地雷达二、三维联合探测在隧道衬砌检测中的应用 135

8.1 忻保高速公路概况 135

8.2 工程地质概述 137

8.2.1 大南陌隧道工程地质概况 137

8.2.2 西南沟 1#隧道工程地质概况 137

8.3 隧道衬砌探地雷达二、三维联合检测方案与流程 139

8.3.1 二、三维联合检测现场测线布置 139

8.3.2 二、三维联合检测流程与实施 139

8.4 不良病害探地雷达二、三维联合检测效果与验证 141

8.4.1 脱空层二、三维联合检测 141

8.4.2 不密实带二、三维联合检测 146

参考文献 150

1 绪 论

1.1 研究意义

随着我国西部大开发战略的深入开展以及国家基础建设拉动内需的进一步投入,交通、铁路网络以前所未有的速度向前发展。2007年年底中国总规模约3.5万千米的“五纵七横”12条国道主干线基本贯通,初步构筑了中国区域和省际间横连东西、纵贯南北、连接首都的国家公路骨架网络,形成了国家高速公路网的雏形。目前中国高速公路里程已位居世界第二位,高速公路通车里程超过5.39万千米,仅次于美国。1998年至2007年的10年间,我国高速公路年均通车里程超过4900千米,是前10年的10倍多。在此基础上中国将再用十二年时间打造总规模8.5万千米以上的国家高速公路网。总的目标是到2010年使高速公路网达到6.5万千米,到2020年达到8.5万千米,新路网由7条首都放射线、9条南北纵向线和18条东西横向线组成,简称为“7918网”。为了应对金融危机,2008年年底国家更是采取有力的扩大内需措施,加大了基础设施特别是高速公路的建设,力争交通固定资产投资规模达到10000亿元/年的水平。为了避免大刷大填引起的滑坡、崩塌碎石、坠落等常见不良地质现象,避免大面积开挖扰动山体,保护环境,在地形、地貌及地质背景复杂区域将会修建更多的隧道工程。而在隧道的修建过程中,由于地质条件极其复杂,施工环境恶劣,如果施工工艺不规范、工序不严格,衬砌内可能会出现空洞、脱空、不密实区、蜂窝麻面等不良病害,建成后当衬砌在经受温度变化、地下水静水压力及空洞区掉块荷载时,容易产生诸如漏水、衬砌裂损、衬砌冻害、衬砌腐蚀等灾害,给工程的正常营运带来安全隐患。因而在施工过程中必须加强质量检测,做到内实外美,保证隧道整体稳定性。

目前隧道检测常用手段有破损检测和无损检测,破损检测常用钻孔取芯法,也就是利用钻机和人造金刚石空心薄壁钻头,从衬砌结构中钻取芯样以检测衬砌内部缺陷的方法,虽是一种直观、可靠和准确的方法,但由于钻孔取芯破损检测易破坏隧道的防排水系统,影响隧道的使用寿命,因而取芯数量有限,极易漏掉内部存在的隐患,检测结果的代表性也差,难以反映结构的整体质量。因此,近20年来人们逐步开始将无损检测技术应用于衬砌的质量检测。无损检测是指在不损及将来使用、不影响使用可靠性的前提下,对隧道衬砌内缺陷进行检查,概括起来主要有利用声、光、电、磁和射线等无损检测方法,其中属于电磁波检测范畴的探地雷达(ground penetrating radar,简称GPR,又名地质雷达),起初在国外它的叫法很多,不过目前国内绝大部分都使用探地雷达一词,

而国外基本统一为 GPR。探地雷达是利用高频脉冲电磁波在地下介质中的传播特性及遇到异常介质时的反射和绕射等波动规律,来探测地下目的体分布形态与特征的一种技术,是根据接收到波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度与波形资料对探测体内不可见的目标体或界面进行探测的电磁技术。由于探地雷达具有快速、无损、高效等特点,近年来在隧道检测领域得到了较为广泛的应用与研究,取得了良好的检测效果,为工程质量的评价和处理提供了可靠的基础资料。

探地雷达探测分为数据采集、信号处理、反演和解释三个环节。目前在探测方法上,探地雷达衬砌检测基本都是应用二维技术,二维检测具有快速、便捷及不影响施工作业等特性,能检测到衬砌内不良病害的存在及定位,但对不良病害的形状、大小、空间形态难以提供更为准确的信息,无法定量确定病害的分布范围;在信号处理方面,基本上是移植了地震勘探中基于傅里叶变换的滤波技术,虽然探地雷达高频脉冲电磁波在介质中运动学规律与地震波有相似性,但传播机制有较大区别,雷达波频率高、波长短、介质吸收强烈,使得经常规滤波处理后隧道衬砌内奇异性分布、奇异点位置所在和奇异程度不突出,边沿信息较模糊;在反演和解释方面,主要依靠经验判断,但隧道现场环境的复杂性、检测表面的不平整性以及各类干扰的存在,势必造成采集数据的质量下降,有效信号不突出,从而给雷达资料的处理和解释带来了困难,极易造成错误解释。总的说来探地雷达在正反演理论、数据处理和雷达图像解释和判断方面还未达到系统和成熟的阶段,特别是在图像解释上还主要依靠经验判断,有待于进一步的探讨和研究。因此探讨提高成像质量、目标识别精度、分辨率及应用效果的正反演和信号处理新理论、新技术和新方法,对提高隧道衬砌检测解释的直观性和准确性具有重要的理论意义和实际应用价值。

1.2 探地雷达技术国内外研究现状

1910年,德国科学家 Letmbach 和 Lowv 在埋地特性的专利技术中首次提出了探地雷达的概念。直到 20 世纪 60 年代末 70 年代初,等效采样技术和亚纳秒脉冲技术的发展,才从技术角度加速了探地雷达的发展,但由于地下介质地质的复杂性和强的电磁衰减特性,电磁波在地下的传播比在空气中传播复杂得多,因此,探地雷达在应用初期仅限于对电磁波吸收很弱的冰层、岩盐等介质中。70 年代后期随着电子技术发展及数字处理技术的应用,探地雷达的研究和应用范围迅速扩大。在国外,世界上第一家专业研制探地雷达的公司——美国 GSSI 公司推出了 SIR 系列探地雷达。随后比利时、意大利、英国、德国、瑞典及挪威的一些大学和科研机构相继推出了各种商用探地雷达产品,如意大利的 RIS-IIK 系列、瑞典的 RAMAC/GPR 系列、日本的 GEORADAR 系列、加拿大的 PULSE EKKO 系列、俄罗斯的 LS-3/RASCAN-2/SPP 系列和英国的 SPRSCAN 系列雷达等。国内对探地雷达的研究起步比较晚,在引进国外仪器的基础上,我国自行研制的探地雷达在硬件设备、信号提取、处理及成像等方面取得了重大突破并开始应用到生产实践中,如中国电波传播研究所的 LTD 系列探地雷达、煤炭科学研究总院重庆分院的 KDK-3/4 型矿井防爆探地雷达、中国科学院长春地理研究所的 SIZR 型探地雷达,东

南大学的 GPR-1 型高频探地雷达、艾迪尔公司的 CBS-9000 和 CR-2000 探地雷达、大连理工大学的 DTL-1 型探地雷达、西安交通大学的无载波脉冲探地雷达以及长江工程地球物理勘测研究院的相控阵探地雷达等。随着雷达系统分辨率和探测深度的提升,雷达系统不但可以获得丰富的信息,也使薄层识别成为可能,因而其应用领域不断扩大,现已覆盖考古、水文地质调查、矿产资源勘探、岩土勘查、工程建筑物结构调查、无损检测、军事等众多领域,成为浅层勘探和无损检测的有力工具。

1.2.1 探测雷达正演研究现状

目前,国内外探地雷达的理论研究明显滞后于实际应用。在对于精度和适应性要求较高的探地雷达衬砌检测环境中,必须事先了解地质体的雷达反射剖面特征,推导和建立理想条件下典型模型的理论 and 实验曲线,以指导实测资料的分析和解释。作为反演与解释基础的探地雷达正演模拟技术,就成了探地雷达理论研究的主要内容之一,探地雷达正演模拟有物理模型试验和数值模拟两种,物理模型实验是基础,是检验数值模拟结果正确与否的最可靠标准,但数值模拟技术更加方便灵活,节约成本。在探地雷达物理模型试验研究方面, Siggins 等(2000)用 1400MHz 高频天线对隧道衬砌中严重的离析、空洞和锈蚀的加固进行了物理模型试验,设计的衬砌厚度小于 0.5m,异常体的尺寸也较小,其分辨率达到了 2cm。Park 等(1997)通过在沙中埋设空洞进行了钢筋网定位和空洞形状探测试验,并在沙堆上方加设 20cm 的钢筋混凝土板,探索探地雷达无损检测的应用能力。Deng 等(1999)研究了 FM-CW 雷达波在 1D 和 2D 有耗和无耗介质中的传播规律,得出在扫描周期为 10ms 和 2ms,天线中心频率为 1~2GHz 的雷达波在有耗介质中的电导率不大于 30mS/m,反演了有耗介质的介电常数。Roberts 等(1994)研究了混凝土内充水和不充水空洞的探地雷达图像特征。Bungey 等(1994)用与混凝土特性相似的水乳胶漆体来代替混凝土,用 1G 的探地雷达天线测试了不同直径、不同间距及不同埋深钢筋的响应特征,并给出了能分开两根钢筋的最小间距。Scott 等(2001)进行了一系列不同厚度的水平裂缝、不同直径的塑料管、同一埋深下不同直径的钢筋和同一直径不同埋深的钢筋的测试试验。结果表明不同直径塑料管或钢筋的雷达波形图像、反射波幅和几何形状均非常相似,差别都很小很难被分辨出来。王惠镰(1993)在灌满淡水(自来水)的深水游泳池内对多种金属或非金属规则形体如柱体、球体、板状体以及这些形体的组合体在充水和不充水的情况下进行了大量的物理模拟试验,为现场探测异常体的识别和进一步正演工作提供了规律和依据。葛如冰等(2009)对高速公路路面不同高度的脱空进行了模型试验,探讨了探地雷达反射波振幅与脱空大小的关系。宁黎磊等(2009)对隧道衬砌空洞积水进行了探地雷达测试,分析了不同积水高度的雷达波形响应特性和识别方法,并提出对于长期受水侵蚀的衬砌,测得的积水高度误差较大。叶良应等(2005)针对地铁隧道最易出现病害的两层衬砌间及衬砌与围岩交界部位的脱空进行了研究,对数据进行了波形分析、2D 切片和 3D 成像处理,并把检测 results 和试件模型作了对比分析,查明了空洞的位置,但是对空洞的形态和大小无法进行定量分析。汪谋(2007)、刘胜峰(2007)、杨进(2007)等对隧道衬砌空洞进行了模型试验,探讨了空洞的图谱特征,但图像受模型边界影响较大。在数值模拟方面,模拟方法比较多,如矩量法(MOM)、时域有限差分法(FDTD)、

有限元法(FEM)、边界元法(BEM)等。其中时域有限差分法始于1966年Yee的著名论文 *Numerical solution for initial boundary problems involving Maxwell's equation in isotropic media*, 其以可直接时域计算、广泛的适用性、计算程序的通用性、节约存储空间和计算时间及简单直观等特点, 现已成为最为重要的电磁场数值模拟方法之一。Wang等(2000)采用改进的完全匹配层(perfectly matched layer, PML)吸收边界模拟探地雷达在色散土壤介质中的传播, 在深度为2m的不同含水量的泥中埋设金属和塑料管, 用200MHz天线模拟了其反射响应, 结果表明: 色散介质中塑料管的响应不同于金属管的响应。Taylor等(1969)用FDTD分析非均匀介质体的电磁散射, 提出用简单插值方法吸收边界来吸收外向行波, 在FDTD的正演模拟中吸收边界的吸收效果可以直接影响到FDTD计算的精确度、图像质量和减少边界反射回波干扰。Mur(1981)提出在计算区域截断边界处的一阶和二阶吸收边界条件及其在FDTD的离散形式。Berenger(1996a、b)提出将麦克斯韦方程扩展为场分量分裂形式, 并构成了完全匹配层(PML)吸收边界条件。Sacks等(1995)和Gedney(1996)提出各向异性介质的单轴各向异性理想匹配层(UPML), 其支配方程是各向异性介质麦克斯韦方程, 这种吸收边界不仅能够吸收传播波, 也能同时吸收凋落波, 具有很好的吸收效果。在国内, 何兵寿等(1988, 2000a、b)建立了二维探地雷达FDTD数学模型, 导出了理想频散关系和超吸收边界条件, 并把它用于探地雷达的数值模拟, 结果表明: 超吸收边界条件能有效减小截断边界的伪反射, 提高正演精度, 取得了满意的效果。刘四新等(2005)应用广义完全匹配吸收边界模拟探地雷达天线在有损耗介质中的传播。戴前伟等(2004)、冯德山等(2006, 2007, 2008)用C语言及VC++开发出了基于时域有限差分法的探地雷达二维正演软件, 导出了DB2-MRTD算法的探地雷达3D差分公式、数值稳定性条件, 开发了探地雷达MRTD(multi-resolution time domain)法正演模拟程序, 并用这些程序进行了二、三维正演模拟。肖明顺等(2008)、詹应林等(2008)研究了二维UPML边界的探地雷达数值模拟。另外, 葛德彪等(2005), 王长清等(1994), 高本庆(1995), 王秉中(2002)等在电磁场基本原理与应用方面都做出了卓越的贡献。

综上所述, 在隧道衬砌内病害的正演模拟中能用于指导工程检测判释的探地雷达数据解释或反演的成果并不多见。都是基于二维、简单的层状模型、圆状空洞等单一的规则地电模型。对其他形状的和组合模型的研究较少, 因此, 应加强对不规则形状和组合模型的正演模拟, 积累经验和资料, 提高判读的准确性和精度。同时, 二维探测只能确定病害的有无, 对病害的形态和范围无法做出判断, 因此, 开展三维病害的物理模型和数值模拟试验, 分析电磁波在隧道衬砌三维空间的传播特性, 认识不同显示方式下病害的图谱特征, 对评估病害的危害程度和提高解释直观性及准确性有着非常重要的现实意义。

1.2.2 探地雷达偏移技术研究现状

为了获取地下真实构造图像、提高地震资料的精度、改善复杂构造地区地震资料质量, 人们开创了一种将地震信息重排的反演算法, 这种算法可以使地震波能量归位到其空间的真实位置, 称为偏移技术。偏移技术还为处理提供了相位、频率、振幅等信息,

用于速度估计和属性分析等。在 20 世纪 60 年代以前,深度偏移是根据反射波的时间、倾角时间差及地层平均速度等,利用尺子和圆规等工具把反射波绘成深度域剖面,重建地下构造形态,具体的操作是:先绘制反射波等 t_0 图,然后根据地层的平均速度,按 t_0 值、等 t_0 值线间距及法线方向换算成偏移后的平面位置和深度,重构地下构造形态图,这就是我们所说的古典偏移方法。这种几何方法的偏移技术只是定性的、概念性的,地下构造的归位精度和偏移剖面的波形特征(包括振幅、相位、频率)都不是很准确,在波动方程叠前深度偏移方法出现后已被淘汰。

20 世纪 70 年代初,地震数据处理进入数字处理时代,以波动方程的数值解为基础,理论严格的波动方程偏移技术诞生,这种偏移技术可以获得更精确的地下构造信息,大大提高了地震勘探的空间分辨率。波动方程偏移技术的基本思路是:在地表产生的弹性波或雷达波向下传播(下行波)过程中,遇到反射界面时会产生反射,如果将反射界面看作新的波源,界面反射波就是新的波源,以波动理论向上传播(上行波),在地表接收到的地震或雷达记录可以看作反射界面产生的波场效应。基于这种思路,以波动方程为基础的偏移技术将地表接收到的波场按波动方程的传播规律反向向下传播,即将波场反向延拓,波场反向延拓到反射界面时得到的成像剖面就是偏移剖面,也就是真实反射界面,达到偏移的目的。波动方程偏移技术出现以后,形成了三类地震偏移成像技术体系:①1972 年, Claerbout 引入了建立在单向波动(抛物线)方程基础上的有限差分偏移方法;②Stolt 和 Gazdag 于 1978 年在频率-波数域求解波动方程,并外推地震波场,提出了频率-波数域偏移方法;③1978 年, Schneider 在绕射偏移法的基础上使用波动方程解的 Kirchhoff 积分公式进行偏移处理,称之为 Kirchhoff(基尔霍夫)积分偏移方法。三类地震偏移成像技术分别基于不同的波动方程解法,其数理基础相同,但波场方向延拓的实现方法各不相同,三类偏移技术各具特点,广义上都属于波动方程偏移。在三类地震偏移成像技术体系的基础上,波动方程叠前深度偏移方法划分为基于射线理论的 Kirchhoff 积分法叠前深度偏移和基于递推波场延拓的叠前深度偏移两类。它们各有优点及不足,不可相互替代。至今,波动方程偏移技术经历了两次发展平缓期和两次发展高峰期。目前,高精度的波动方程叠前深度偏移技术广泛应用于工程实际中,国内外许多学者做了深入的研究。

Kirchhoff 积分法叠前深度偏移通过对散射波场及其观测法向导数的积分实现波场反向延拓。基尔霍夫偏移法的几何意义比较直观,采用绕射叠加法,比较简单、计算效率高,可以实现局部目标成像。但传统的基尔霍夫偏移采用的射线追踪技术无法处理多路径(或多波至)、焦散、干涉等复杂波现象;采用基于射线理论的高频解近似格林函数,这种近似对菲涅尔带的影响导致成像分辨率随着深度增加而变差,因此,基尔霍夫偏移方法对深部结构的程序质量往往不理想。1974 年,我国工程院院士李庆忠和刘雯林等发展了绕射扫描叠加技术, French 和 Schneider 于 1978 年在绕射叠加偏移技术的基础上使用了波动方程解的基尔霍夫积分公式,并将其发展为地震偏移的波动方程积分法,这是基尔霍夫偏移技术的理论基础。该理论使绕射偏移方法建立在波传播的基本理论上,新的积分法考虑了波的振幅随传播方向和传播距离的变化,保持了波的振幅特性,具有一定的保幅性,而且在计算式中有高频修正因子,在一定程度上弥补了积分过程中高频成分的损失。基尔霍夫偏移可以适应任意倾角的反射界面,剖面网格要求灵活,但基尔霍

夫偏移技术难以处理横向速度变化，偏移背景噪声大，对偏移参数较敏感，难以确定合适的偏移参数。

Claerbout 教授于 1972 年第一次提出采用有限差分法解单程波动方程的近似式，采用地表实测的数据反向延拓地下传播的波场，并提取地下界面波源，构建偏移成像剖面。这种算法借助于差分计算，把密度、速度等介质参数的影响都体现在差分计算矩阵方程中，使波动方程有限差分偏移技术能适应速度场的任意变化。但由于对单平方根算子进行有理级数展开引起的高波数近似，使得波动方程有限差分偏移技术对陡倾角界面的成像误差较大。这种偏移技术早前只能应用于倾角不超过 15°的地下反射界面。1985 年，Claerbout 等创立了双平方根偏移的基础理论，为波动方程有限差分法偏移技术的改进提供了理论基础。1987 年，Beasley 提出了一种改进的波动方程有限差分偏移方法，得到了地下反射界面倾角达 45°的理想偏移剖面。国内，马在田院士完成了高阶波动方程有限差分偏移技术，张关泉教授完成了低阶大倾角波动方程有限差分偏移技术。

频率-波数域偏移技术借助于快速傅里叶变换来进行波场反向延拓，最早由 Stolt 于 20 世纪 70 年代后期提出，它的基本思想就是在频率-波数域中用相移量来计算波场的反向延拓量。1983 年，Dubrulle 实现了水平层状介质中固定偏移距的偏移技术；1990 年，Deregowski 完成了频率-波数域常速相移法偏移技术。随后，Baoniu 在 CWP 研究报告中提出了相移加插值法(PSPI)频率-波数域偏移理论，这种理论通过把合适的相移量应用到未偏移的数据上来实现偏移，可以很好地解决速度随深度变化的问题，并允许速度有一定的横向变化，但成像过程中需要对频率分量进行大量的运算，计算效率低，并且延拓层间的成像只能在时间域进行插值运算。Kim 等提出了递归频率-波数域偏移技术，计算效率大大提高，后面又出现了剩余递归频率-波数域偏移技术、串联或并联偏移技术。美国的加德纳实现了频率-波数域滤波的频率域插值计算。目前，频率-波数域滤波偏移技术已基本可以适应纵向、横向速度变化，广泛应用于地震勘探数据的偏移归位处理中，各类偏移技术如表 1.1 所示。

目前，偏移技术也是探地雷达技术数据处理的重要技术之一，其目的是提高探地雷达的横向分辨率，以便提取反射波的波形特征(包括振幅、相位、频率)参数，帮助解释地下目标体信息。

表 1.1 偏移技术分类表

序号	类型	论述
1	叠加	适用于水平层状介质(对小倾角地层也适用)
2	法向射线深度转换	严格适用于没有构造倾角且速度只随深度变化的情况
3	时间偏移	适用于叠加剖面上有绕射波或构造倾角以及速度有垂向变化的情况；速度横向变化不大时也可用
4	深度偏移	用于叠加剖面上有构造倾角和强横向变速的情况
5	叠前部分偏移(PSPM)	叠后偏移适用于叠加剖面与零炮检距剖面的情况，但不适合具有不同叠加速度的地层倾角不一致或强横向变速的地区，叠前部分偏移(倾角时差(DMO)校正)能够为叠后偏移提供更好的叠加剖面，但叠前部分偏移只解决具有不同叠加速度的地层倾角不一致的问题
6	叠前全时间偏移	输出偏移剖面，不产生未经偏移的中间叠加剖面，但无论如何这是解决倾角不一致地层问题的最精确的方法。叠前部分偏移是这种处理方法的一种简化

续表

序号	类型	论述
7	叠前深度偏移	用于横向变速严重的情况,这时已无法做合适的叠加处理
8	三维叠后时间偏移	用于叠加剖面上出现来自射线平面以外的倾斜同相轴(即垂直侧线方向)的情况,这是叠后最常用的一种三维偏移方法
9	三维叠后深度偏移	用来解决与三维地下复杂构造有关的强横向变速问题
10	三维叠前时间偏移	用于叠前部分偏移不适用的叠加剖面上有横向倾斜层反射的情况
11	三维叠前深度偏移	用于叠后偏移和时间偏移不能正确成像的具有强横向变速的三维复杂地区,它对三维速度-深度模型的精度有较高的要求

1.2.3 探地雷达信号滤波研究现状

在隧道检测过程中为了得到更多的反射波特征,通常利用宽频带进行记录。由于衬砌介质和围岩相当于一个复杂的滤波器,介质的物性和几何性质的不均一性使得电磁波在其中的传播非常复杂,各种噪声和杂波的干扰非常严重,因此,在记录各种有效波的同时,不可避免地记录下了各种干扰噪声,其回波信号不再是发射信号的简单叠加,附带了一些不同尺度变化和波形畸变的子波,这些子波与反射脉冲一起形成探地雷达的回波信号,具有非平稳性、脉冲信号非线性衰减等特点,使得记录的探地雷达回波剖面不能准确清晰地反映目标体。因此,必须对探地雷达回波信号进行数据处理,以改善数据质量,为进一步的图像判释和地质解释提供清晰的回波剖面图。长期以来,在探地雷达信号处理方面最常用的是以傅里叶变换为基础的各种滤波方法,这种滤波方法具有低通平滑作用,使得在消除高频噪声的同时也会模糊边缘位置信息,造成信号发生某种程度的畸变,同时傅里叶分析反映的是信号的整体特征,无法表述信号的时频局域性质。而小波变换具有自动变焦功能,在时域和频域都具有很好的局部化性质,通过尺度的伸缩可实现时频域分辨率的大小变化,故能有效区分信号中的突变部分和噪声,因而本质上适应于非平稳探地雷达信号的分析与处理,许多研究者利用这些特性进行信号的去噪处理,并已取得了较好的效果。Mallat 等(1992)最早提出了基于小波分析和子带分解的边缘检测与滤除噪声的方法。Xia 等(1996)设计了 GHM 多小波的一种新的预处理方法,并用实例分析了一种适当的预、后处理算法,比 DB4 小波有更好的能量压缩能力。Chui 等(1996)研究了多小波的正交性、紧支撑性、对称性和插值性等,利用对称性构造出支撑区间在 $[0, 2]$ 和 $[0, 3]$ 上的二重多尺度函数和多小波函数,并且不采用分形插值的方法重构了 GHM 多小波,Chui 等构造的多小波称为 Chui-Lian 多小波,也简称 CL 多小波。斯坦福大学以 Donoho 为首的一个学术群体提出了小波阈值滤波算法,取得了大量的理论及应用成果,邹海林等(2005a、b、c)探讨了多小波预处理方法对信号去噪性能的影响,并以实例对探地雷达信号进行了处理与分析,取得较好效果。詹毅等(1999)讨论了小波变换在信号滤波中的原理和各种实现方法,与傅里叶变换域滤波进行了比较,并对实际的探地雷达信号进行了处理,结果表明,基于小波变换域的滤波能滤除 80%~90% 的噪声,同时可基本保持原信号的边缘不变。魏童(2009)建立了适合一维雷达信号的新阈值函数小波降噪处理算法,确立了识别脱空层的方法,创建了结合小波包、KL 变换以

及中值滤波法的联合去噪算法,并以仿真试验结果验证了去噪方法的有效性和去噪效果。另外,潘泉等(2005),程正兴(2006),王大凯等(2006),魏明果(2005),杨福生(1999),秦前清等(1995),刘明才(2005),刘志刚(2003),徐长发等(2004)都在小波理论与信号处理方面做出了卓有成效的贡献。但与探地雷达工程实际应用的迅速发展相比较,在信号处理方面的研究进展却显得缓慢得多。同时,对于不同的研究对象,在不同场合下,小波基的选取不同,其信号处理效果也不一样,特别是多小波理论在理论上所表现出来的独特优势在实际应用中还存在很多问题,如对信号处理需要首先进行预滤波,而预滤波又会破坏所设计的多小波的特性,因此,研究适合隧道衬砌检测的探地雷达信号处理多小波算法对更好的突出有效信号、提高判释的准确性具有重要意义。

1.2.4 探地雷达反演研究现状

探地雷达探测分为数据采集、数据处理、反演和解释三个环节,所谓反演问题就是由探测结果及某些一般原理(或模型)出发确定表征模型或介质的电导率、磁导率、介电常数等物理参数分布,从而得到区域介质的空间结构分布,即把探地雷达中观测到的电场或磁场值映射到相应的地下介质模型的理论和方法。凡涉及观测与演绎的,均无法回避反演问题,反演解释才是地球物理工作的最终目的,也必然是地球科学研究的主要方向之一。Cai等(1996)利用井间雷达资料反演了介质电磁波速度问题,证明了当岩体的电导率大于 0.002S/m 时 Maxwell 方程反演的结果优于射线追逐雷达成像,而小于等于 0.001S/m 时两种方法同等有效,但使用波动方程反演计算量增加若干数量级。Hansen等(2000)对层状界面 GPR 反演格式进行了研究。Meinke(2001)研究了有耗土壤中性线补偿的 GPR 反演方法,正演模型采用的是基于 Born 近似和格林函数的双层模型,反演采用 Tikhonov 正则化的伪逆法,并举例说明了反演方法的性能。Cui等(2004)指出 Born 近似对于目标特性相差大的介质无效,为避免多重散射,利用高阶 Born 近似研究了地下物体低频探测的反演方法,并用实验验证了它的有效性。Ramm(1997, 1998, 2000)在频域积分方程 Born 近似意义下建立了反演地下介质参数电导率和介电常数的模型并研究了相应的反演方法。Romanov(1987, 1989, 1994, 1997)总结了 20 世纪 90 年代早期 Maxwell 方程反问题的研究工作,研究了 Maxwell 方程的反演理论,归纳出有限差分格式反演、线性化反演、牛顿法、共轭梯度反演的优化方法。Haber 把牛顿法应用到时间域的二维 Maxwell 反演问题中,在此基础上进行了预处理,提出了人工时间步长的新方法和修正源的新概念,并将其成功应用到实际计算中,取得了较好效果。国内探地雷达的反演研究起步较晚,王兆磊等(2004, 2007)从二维 Maxwell 方程组出发,通过引入一个由 Maxwell 方程计算的伴随场,将目标函数对介质参数的导数表示成显式形式,用共轭梯度法迭代推导出了反演介电常数和电导率等二维介质物性参数的反演公式,并对粗糙地表的非导电介质中含噪信号与无噪信号介电常数反演结果进行了对比,属于一种线性化反演方法。李壮等(2007a, 2007b, 2008, 2009)从电磁场基本理论出发阐述了探地雷达反问题模型的构造过程,将同伦算法、同伦参数微分反演算法、同伦自适应方法引入地下介质电导率参数识别的反演过程中,证明了算法的收敛性,并以实例验证了算法的有效性。综上所述,探地雷达反演问题是不适定、非线性的。国内在探地雷达反演方