



“十二五”国家重点图书出版规划项目

空间射频信息获取新技术丛书



探地雷达理论与应用

Ground Penetrating Radar: Theory and Applications

[美] Harry M. Jol 主编

童孝忠 周 旻 等译

审校

“十二五”国家重点图书出版规划项目
空间射频信息获取新技术丛书

探地雷达理论与应用

Ground Penetrating Radar
Theory and Applications

[美] Harry M. Jol 主编
雷文太 童孝忠 周 旻 等译
雷文太 柳建新 审校

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书由 Harry M. Jol 主编, 由 20 余位探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 领域的专家分章撰写而成。内容方面涵盖了探地雷达基本理论与几乎所有应用领域的探测方法与实例分析, 包括探地雷达基本原理、环境探测领域的应用、地球探测领域的应用、市政工程与地雷探测和考古方面的应用, 共四部分, 由 15 章内容组成。无论是从探地雷达系统开发设计还是从探地雷达探测应用方面来讲, 本书都与工程实践紧密结合。书中详细阐述了探地雷达的基本理论方法与各应用领域的探测方法, 给出了大量的探测实例与分析结果, 其内容涵盖之丰富是其他探地雷达书籍所罕见的。

本书对探地雷达研究人员而言是一本极具参考价值的专著, 对相关应用领域的研究人员也是一本实践指导性很强的技术书籍。

本书适合从事雷达工程、地球物理探测、环境工程、地质勘探等领域工作的硕士生、博士生、教师和研究人員阅读。

Ground Penetrating Radar: Theory and Applications

Harry M. Jol.

ISBN-13: 9780444533487

Copyright © 2009 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN-13: 978-981-272-561-5

Copyright ©2011 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Publishing House of Electronics Industry under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

This edition is authorized for sale in Mainland of China. Unauthorized export of this edition is a violation of Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予电子工业出版社, 仅限在中国大陆出版发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2009-7354

图书在版编目 (CIP) 数据

探地雷达理论与应用 / (美) 乔尔 (Jol, H. M.) 主编; 雷文太等译. - 北京: 电子工业出版社, 2011.6
(空间射频信息获取新技术丛书)

书名原文: Ground Penetrating Radar: Theory and Applications

ISBN 978-7-121-13384-8

I. ①探… II. ①乔…②雷… III. ①探地雷达-高等学校-教材 IV. ①TN959.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 074942 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 李秦华

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 23.5 字数: 602 千字 彩插: 2

印 次: 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

译者序

在过去的 20 年间, GPR 技术发展迅速, 在世界范围内出现了 GPR 系统设计与探测应用的热潮。其快速无损的优点使得该项技术被越来越多领域的技术人员所采用。本书是由美国威斯康星大学欧克莱尔分校的 Harry M. Jol 教授联合世界范围内 20 余位 GPR 领域的同行编写完成的。这些作者在各自的专业技术领域都有着深厚的理论造诣与丰富的实践经验, 他们共同努力的结果使得该书无论是在理论深度、实践操作方面还是在涉及跨领域应用方面都有着极强的实践指导价值。

本书全面详细地论述了 GPR 的基本理论和应用技术, 主要内容由四部分组成。第一部分是 GPR 基本理论与方法, 主要包括: GPR 电磁学原理、物质材料的电磁属性、GPR 系统与设计方案、天线技术、GPR 数据处理和分析方法。第二部分论述了 GPR 在环境探测领域中的应用, 主要内容包括: 土壤、泥炭地探测和植物体监测, 水资源探测和污染物监测。第三部分论述了 GPR 在地球探测领域中的应用, 包括风蚀沙丘探测, 海岸环境探测, 河流沉积探测以及冰川冰床探测。第四部分则主要论述了 GPR 在市政工程与地雷探测和考古方面的应用, 包括交通设施的无损检测实验 (Non-destructive Testing, NDT), 地雷和未爆炸弹 (Un-exploded Ordnance, UXO) 探测分类以及考古探测。本书的内容也反映了国际上当前 GPR 领域的技术水平和研究现状。

本书翻译组近年来一直致力于 GPR 系统设计和信号处理方面的研究工作。所在的科研团队先后承担了国家“十一五”科技支撑项目、国家“863”高技术研究项目、国家自然科学基金项目和国家博士后科学基金项目的支持, 研制了公路病害探测专用雷达和铁路路基病害探测专用雷达, 在系统设计和信号处理方面进行了大量的富有成效的探索研究, 取得了丰硕的研究成果。相关成果已经形成了专著、专利与学术论文。在与众多应用领域的相关技术人员交流时, 深感 GPR 技术在国内的应用不够广泛, 可供参考的探测实例太少。本书的翻译出版正是填补了这一空白。

本书由中南大学信息物理工程学院柳建新院长负责翻译的组织工作。雷文太负责翻译本书的第 1 章至第 5 章、第 8 章、第 10 章至第 14 章, 周畅负责翻译本书的第 6 章和第 7 章, 童孝忠负责翻译本书的第 9 章和第 15 章。雷文太和柳建新负责审校全书。在翻译的过程中还得到了刘文劼、曹创华、汤文武、甘佳雄、刘鹏茂等硕士研究生的帮助, 在此谨表谢意。

由于时间仓促, 水平有限, 译稿难免存在不妥之处, 恳请读者指正。

序 言

在过去的 15~20 年中,探地雷达(GPR)技术无论是在理论、方法还是在各相关领域的应用方面都取得了长足的发展。该技术也被不同学科领域的科学家、研究人员、工程师视为是一种极有价值的探测方法。GPR 应用趋于多样化,包括地下水污染物探测、地质工程探测、沉积物探测、冰川探测和考古探测等。这些应用推动了 GPR 在地球物理勘探和地质工程探测领域的快速发展,同时又在学术界和工业界引发了新兴的交叉学科的研究。在十余年前,GPR 这一论题在地球物理相关文献中很少被提及。而现在,围绕该论题有相当多的研究论文和专刊发表出来。关于 GPR 理论、技术和应用的大量文献的出版,促成了这本书的编写。这本书提供了 GPR 领域的一个概括性总览以及若干领域的最新应用成果。本书也为 GPR 从业人员和入门者提供了丰富的背景知识和探测实例,可作为查阅手册和基本参考读物来使用。

本书第一部分从 GPR 基础知识展开论述,包括 GPR 电磁学基本原理(作者 Annan),岩石土壤和流体的电磁属性(作者 Cassidy),系统与amp;设计(作者 Koppenjan),天线(作者 Daniels)和数据处理、模型与分析(作者 Cassidy)。第二部分涉及 GPR 在环境工程中的应用,包括土壤、泥炭地探测和植物体监测(作者 Doolittle and Butnor),水资源探测(作者 Slater and Comas)和污染物监测(作者 Redman)。第三部分包括 GPR 在地球科学中的应用,包括风蚀沙丘探测(作者 Bristow),海岸环境探测(作者 Buynevich et al.),河流沉积探测(作者 Bridge)以及冰川冰床探测(作者 Arcone)。第四部分包括 GPR 的其他工程学应用,包括交通设施无损检测实验(作者 Saarenketo),地雷和未爆炸弹探测分类(作者 Yarovoy)以及考古探测(作者 Goodman et al.)。

各章给出了 GPR 当前的技术发展水平以及作者认为与之相关的技术问题。各章的作者都是相应领域的领军人物,分别任职于工业部门、咨询机构、政府部门和学术机构等。以这种形式来编排本书,各章反映了各作者在各自专业领域的特长,章与章之间并没有统一的格式。读者将会发现某些章节是以理论分析为主,某些章节侧重于数学推导,而有些章节则是采用实例分析的编排方法。每章后面都列出了大量的与本章主题相关的参考文献,便于感兴趣的读者进行深入阅读。参考文献主要包括科技期刊和技术报告等。整体上看,这本书从多学科、大视角的角度展示出了 GPR 这一技术坚实的理论基础和广阔的应用前景。另外,本书还为学生们提供了 GPR 技术最新的研究成果和当前的技术发展现状。它还对那些有志于开拓新兴应用领域的地球物理顾问、研究人员和工程师提供了方法论的指导,并有望扩展这些从业人员进行高效地下探测的能力。它也有助于行业之外的特殊用户获得所需的与 GPR 主题相关的信息。

感谢以下人员对本书的评阅与指导:S. Arcone, M. Bano, W. Barnhardt, J. Bridge, I. Buynevich, N. Cassidy, M. Collins, X. Comas, I. Craddock, D. Daniels, J. Doolittle, A. Enders, D. Goodman, S.-E. Hamran, S. Koppenjan, I. Lunt, C. Peterson, D. Redman, M. Sato, T. Savelyev,

T. Scullion, R. Versteeg, B. Welch, R. Young 和 A. Yarovoy。另外，也感谢应作者要求对各章内容进行评阅的专家，他们的专业知识为本书增色不少；但各章的作者本人最终对各章的内容负责。

感谢 Brian Moorman，是他的洞察力和远见促成了这本书的编写。本书的编写和出版很大程度上是在 Linda Versteeg 的指导和支持下完成的。同时感谢我的家庭 (Carleen, Brianna 和 Connor) 以及威斯康星大学欧克莱尔分校在整本书编辑过程中的支持。最后，我承认，由于种种原因，本书的出版延误了几个阶段。最终本书得以出版是在多位作者以及出版社的耐心支持下完成的——他们的毅力是非常值得赞赏的。

Harry M. Jol

威斯康星大学欧克莱尔分校

本书编写人员

Peter Annan

Sensors and Software Inc.
1040 Stacey Court
Mississauga, ON L4W 2X8
Canada
E-mail: apa@sensoff.ca

Steven A. Arcone

US Army ERDC-CRREL
72 Lyme Road
Hanover, NH 03755-1290
USA
E-mail: Steven.a.arcone@usace.army.mil

John Bridge

Binghamton University
Department of Geological Sciences and Environmental
Studies
Po BOX 6000, Binghamton, NY 13902-6000
USA
E-mail: jbridge@binghamton.edu

Charlie Bristow

School of Earth Sciences
Birkbeck College University of London
Malet Street
London WC1E 7HX
United Kingdom
E-mail: c.bristow@ucl.ac.uk

John Butnor

USDA Forest Service
Southern Research Station
705 Spear Street
South Burlington, VT 05403
USA
E-mail: jbutnor@fs.fed.us

Ilya V. Buynevich

Coastal Systems Group
Geology & Geophysics Department
MS #22
Woods Hole Oceanographic Institution
Woods Hole, MA 02543

USA

E-mail: ibuynevich@whoi.edu

Nigel Cassidy

School of Physical and Geographical Sciences
William Smith Building
Keele University
Staffordshire, ST5 5BG
United Kingdom
E-mail: n.j.cassidy@esci.keele.ac.uk

Xavier Comas

Department of Geosciences
Florida Atlantic University
777 Glades Road
Boca Raton, FL 33432
USA
E-mail: xcomas@fau.edu

Brian Damiata

Costen Institute of Archaeology
University of California Los Angeles
Box 95159, A210 Fowler Building
Los Angeles, CA 90095-1510
USA
E-mail: damiata@ucla.edu

David Daniels

Antennas and Electronics Division,
ERA Technology
Cleeve Road
Leatherhead, Surrey, KT22 7SA
United Kingdom
E-mail: david.daniels@era.co.uk

James Doolittle

USDA-Natural Resources Conservation Service-National
Soil Survey Center
11 Campus Blvd., Suite 200
Newtown Square, PA 19073
USA
E-mail: jim.doolittle@lin.usda.gov

Duncan FitzGerald

Department of Earth Sciences

Boston University
675 Commonwealth Avenue
Boston, MA 02215
USA

E-mail: dunc@bu.edu

Dean Goodman

20014 Gypsy Land
Woodland Hills, CA 91364
USA

E-mail: gal_usa_goodman@msn.com

Noriaki Higashi

Saitobaru Archaeological Museum
Saito City, Miyazaki Prefecture
Japan

E-mail: higashi-noriaki@pref.miyazaki.1g.jp

Hiromichi Hongo

Saitobaru Archaeological Museum
Saito City, Miyazaki Prefecture
Japan

E-mail: hongo-hiromichi@pref.miyazaki.1g.jp

Harry Jol

Department of Geography and Anthropology
University of Wisconsin-Eau Claire
105 Garfield Avenue
Eau Claire, WI 54702-4004
USA

E-mail: jolhm@uwedc.edu

Steven Koppenjan

Special Technologies Laboratory
5520 Ekwill Street
Santa Barbara, CA 93111
USA

E-mail: kopensk@nv.doe.gov

Yasushi Nishimura

UNESCO-ACCU
757 Horen-cho
Nara 630-8113

E-mail: yasushi@nabunken.go.jp

Salvatore Piro

Consiglio Nazionale Delle Ricerche istituto per le Techno-
logie
Applicate ai Beni Culturali
00016 Monterondo

SCALO, Rome c. post. 10

Italy

E-mail: salvatore.piro@itabc.cnr.it

David Redman

Sensors and Software Inc.

1040 Stacey Court
Mississauga, ON L4W 2X8
Canada

E-mail: dr@sensott.ca

Timo Saarenketo

Roadscanners Oy

Urheilukatu 5-7

P. O. Box 2219

FIN-96101 Rovaniemi

Finland

Email: timo.saarenketo@roadscanners.com

Kent Schneider

Underground Imaging Solutions, Inc. ,

9790 Misty Cove Lane

Gainesville, GA

USA

E-mail: krschne@bellsouth.net

Lee Slater

Earth & Environmental Sciences

Rutgers-Newark

101 Warren St.

Newark, NJ 07102

USA

E-mail: lslater@andromeda.rutgers.edu

John Steinberg

Fiske Center for Archaeological Research

University of Massachusetts Boston

100 Morrissey Boulevard

Boston, MA 02125

USA

E-mail: john.steinberg@umb.edu

Alexander Yarovoy

Int. Research Centre for Telecom and Radar

Delft University of Technology

Mekelweg 4

2628 CD Delft

The Netherlands

E-mail: a.yarovoy@ewi.tudelft.nl

目 录

第一部分 GPR 原理

第 1 章 GPR 的电磁学原理	2
1.1 简介	2
1.2 GPR 基本工作原理	3
1.3 电磁场的波动特征	5
1.4 GPR 信号测量	11
1.5 扫描方法	18
1.6 数据分析与解译	21
1.7 小结	24
参考文献	24
第 2 章 岩石、土壤和流体材料的电磁属性	28
2.1 简介	28
2.2 材料的电磁属性:基本理论	29
2.3 介电常数和电导率:电介质的电气参数	30
2.4 材料性能:与电磁波特性的关系	39
2.5 实际材料的电磁属性:实用分析	41
2.6 真实材料的响应特性	42
2.7 小结	45
致谢	45
参考文献	46
第 3 章 GPR 系统设计	51
3.1 简介	51
3.2 GPR 工作体制概论	51
3.3 射频技术参数	53
3.4 GPR 设计的一般准则	56
3.5 冲激脉冲 GPR	57
3.6 连续波 GPR	60
参考文献	66
第 4 章 天线	69
4.1 简介	69
4.2 天线基本参数	70
4.3 GPR 天线	77
参考文献	90

第 5 章 GPR 数据处理、模型与分析	95
5.1 简介	95
5.2 GPR 数据处理的背景情况和应用准则	96
5.3 GPR 数据处理:发展好的适用方法	97
5.4 基本的 GPR 数据处理步骤	98
5.5 处理、成像和可视化:备注	117
致谢	117
参考文献	117

第二部分 环境工程应用

第 6 章 土壤、泥炭地探测和植物体监测	124
6.1 简介	124
6.2 土壤	124
6.3 植物体监测	133
参考文献	136
第 7 章 GPR 在水资源研究中的应用	141
7.1 简介	141
7.2 岩石物理学	143
7.3 水地层特征	145
7.4 流动和传输参数的分布/成带	147
7.5 水分含量估计	150
7.6 监控动态水文过程	155
7.7 小结	164
参考文献	165
第 8 章 污染物监测	173
8.1 简介	173
8.2 污染物类型	173
8.3 被污染的岩石和土壤的介电特性	174
8.4 污染物的典型分布	177
8.5 GPR 探测方法	178
8.6 数据处理和解译	179
8.7 实例分析	181
8.8 小结	184
参考文献	185

第三部分 地球科学应用

第 9 章 GPR 在风蚀沙丘中的应用	190
9.1 简介	190
9.2 沙丘	190

9.3	探测方案的设计	192
9.4	地形地貌测量	194
9.5	沙丘沉积结构成像和沙丘分层	195
9.6	雷达相	196
9.7	雷达分层和边界表面	196
9.8	沙丘边界面	197
9.9	沙丘年表和迁移	199
9.10	层理分析	200
9.11	古风积沙岩	201
9.12	三维成像	201
9.13	成土蚀变及早期成岩作用	201
9.14	小结	204
	致谢	204
	参考文献	204
第 10 章	海岸环境	207
10.1	简介	207
10.2	方法论	207
10.3	GPR 在海岸环境方面的优势	209
10.4	沿海环境 GPR 使用的局限性	210
10.5	海岸环境的 GPR 研究	211
10.6	海岸环境的 GPR 成像实例	211
10.7	小结	218
	致谢	219
	参考文献	219
第 11 章	GPR 在河流沉积学中的应用进展	226
11.1	简介	226
11.2	河流沉积的尺度规模和 GPR 的分辨力	226
11.3	GPR 应用于河流沉积学的实例	228
11.4	小结与讨论	249
	致谢	250
	参考文献	250
第 12 章	冰川和冰层探测	255
12.1	简介	255
12.2	南极洲	256
12.3	阿拉斯加州	268
12.4	小结	275
	参考文献	276

第四部分 市政工程、地雷探测和考古方面的应用

第 13 章 交通设施的无损检测	280
13.1 简介	280
13.2 GPR 硬件和配件	281
13.3 数据采集	284
13.4 数据处理和解译	287
13.5 与其他道路普查数据相集成的 GPR 数据分析	292
13.6 GPR 在公路中的应用	295
13.7 桥梁应用	301
13.8 铁路应用	304
13.9 GPR 在机场跑道探测中的应用	307
13.10 小结与建议	309
参考文献	309
第 14 章 GPR 对地雷和未爆物的探测和分类研究	318
14.1 简介	318
14.2 电磁分析	319
14.3 系统设计	324
14.4 地雷/未爆物探测和分类中的 GPR 数据处理	329
14.5 与其他传感器融合	333
14.6 GPR 作为未爆物/地雷探测器的整体性能分析	335
14.7 小结	336
参考文献	337
第 15 章 GPR 考古	342
15.1 简介	342
15.2 考古信息获取的方法	343
15.3 应用于考古的成像技术	344
15.4 深度测量	345
15.5 实例分析	346
致谢	361
参考文献	361

第一部分 GPR 原理

- 第 1 章 GPR 的电磁学原理
- 第 2 章 岩石、土壤和流体材料的电磁属性
- 第 3 章 GPR 系统设计
- 第 4 章 天线
- 第 5 章 GPR 数据处理、模型与分析

第 1 章 GPR 的电磁学原理

A. P. Annan

1.1 简介

探地雷达(GPR, Ground Penetrating Radar)技术业已成为地球物理界广为接受的一项探测技术。该方法利用无线电波来探测“地下”任何低损耗的介质材料。在 GPR 技术发展早期, GPR 主要用来探测自然的地质材料。而现在, GPR 技术的应用可扩展到对其他介质材料(如木材、混凝土和沥青等)的探测。

地下有耗介电材料的多样性和电磁波频谱的宽泛性使得 GPR 技术具有极为广阔的应用空间。该方法已经应用于冰川探测和混凝土材料的无损探伤等多种探测场合, 探测尺度从千米量级到厘米量级不等。

GPR 最常用的探测方式是采用单个固定形式的发射/接收天线组合, 通过在地表移动该天线组合实现对地下区域的反射探测。某些情况下, 通过对体区域的透射探测则更为有效。GPR 探测示意图如图 1.1 所示, 某个 GPR 探测实例如图 1.2 所示。

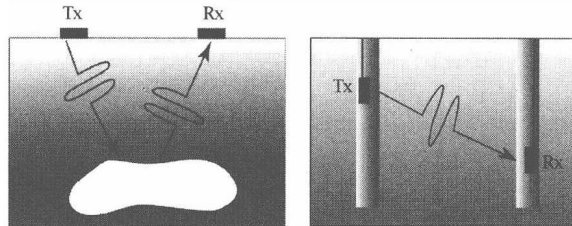


图 1.1 GPR 运用电磁波来探测地下的有耗电介质材料。常用的是两种探测模式。第一种模式下, 所探测的是反射或散射能量。第二种模式下, 穿过物质材料的透射能量被探测

很早以前, 人们就有利用无线电波来进行地球探测的想法, 但直到 20 世纪 50 年代这种想法才得以实现(El Said, 1956; Waite and Schmidt, 1961)。Waite 运用机载雷达实现冰层探测的实验引发了世界范围内的电波反射探测实验。以此为起点, GPR 科技工作者逐步开展了对土壤和岩石等介质材料的探测。该类目标的探测试验研究始于 20 世纪 60 年代, 到现在仍然在继续进行着。

从 GPR 技术的发展初期到现在, 人类基础物理学的发展可谓突飞猛进, 对各类材料属性的探索研究蓬勃发展, 这些因素共同促成了 GPR 技术在多个领域中层出不穷的应用(Davis and Annan, 1989)。关于该技术的简要发展历程可参见参考文献 Annan(2002)。参考文献 Bristow and Jol(2003)和 Rubin and Hubbard(2005)分别给出了 GPR 应用于地质地层探测和水文地质探测的详细描述。

GPR 技术具有其自有的专用术语和操作方法。本章的目的是提供关于 GPR 基本概念、物理术语和实践经验的简要概括, 为 GPR 技术的应用打下坚实的基础。

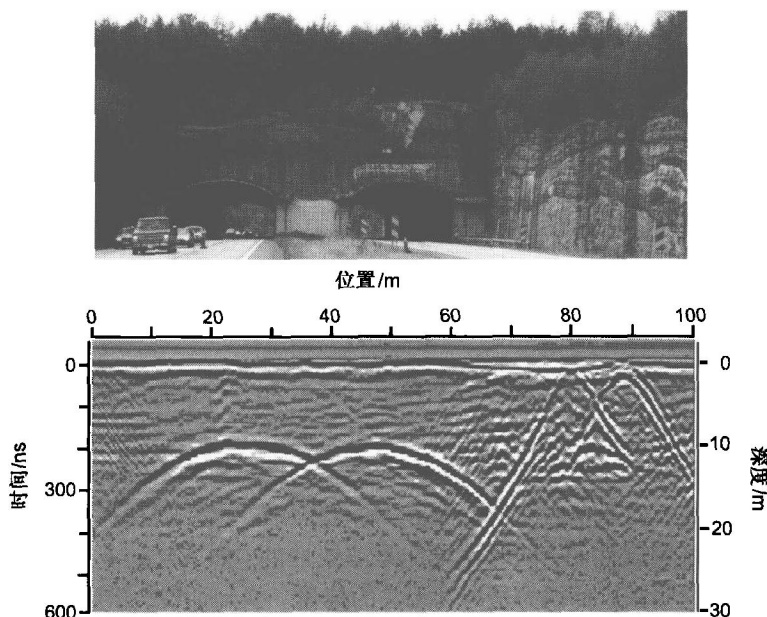


图 1.2 运用 50 MHz 天线在两个隧道的上面进行横跨隧道的探测, 所获得的 GPR 的剖面图。GPR 信号的幅度是扫描位置(水平轴)和旅行时(垂直轴)的函数

1.2 GPR 基本工作原理

1.2.1 概述

GPR 技术的理论基础是电磁波基本理论。该理论的发展史跨越两个多世纪, 相关的文献资料很多, 如 Jackson(1962)和 Smythe(1989)等。此处的概述主要介绍 GPR 定量分析所需的基础理论框架。

麦克斯韦方程组描述了电场和磁场的相互关系, 同时包含了物质的属性参数, 为定量分析 GPR 探测性能提供了理论基础。

1.2.2 麦克斯韦方程组

数学上, 电场、磁场及其二者的关系可描述如下

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4)$$

式中 \mathbf{E} 表示电场强度矢量(V/m), q 表示电荷密度(C/m^3), \mathbf{B} 为磁感应强度(T), \mathbf{J} 为电流密度(A/m^2), \mathbf{D} 为电位移矢量(C/m^2), t 表示时间(s), \mathbf{H} 为磁场强度(A/m)。

麦克斯韦在前人大量研究成果的基础上导出了上述的紧致形式方程组, 该方程组结合物质的属性参数描述则可实现对所有经典电磁问题(如电磁感应、电波辐射、电阻问题、电路理论等)的理论分析。

1.2.3 本构方程

本构关系是用来描述物质材料受外部电磁场影响的关系函数。对 GPR 而言,物质材料的电场和磁场属性尤为重要。本构关系提供了物质的电子、原子和分子在外部电磁场作用下的整体宏观特性描述如下

$$\mathbf{J} = \tilde{\sigma} \mathbf{E} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{D} = \tilde{\varepsilon} \mathbf{E} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{B} = \tilde{\mu} \mathbf{H} \quad (1.7)$$

电导率 $\tilde{\sigma}$ 描述了物质材料在外加电场作用下自由电荷运动产生电流的属性参数。对电荷运动的阻滞会导致能量的耗散。介电常数 $\tilde{\varepsilon}$ 描述了介质中束缚电荷在外加电场作用下的偏移属性参数,电荷的偏移导致了物质材料中能量的存储。磁导率 $\tilde{\mu}$ 描述了物质材料对外加磁场固有的原子和分子磁化属性参数。对简单媒质材料而言,磁化作用也导致了材料中能量的存储。

$\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\varepsilon}$ 和 $\tilde{\mu}$ 是具有张量属性的,同时也可能是非线性的,如 $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(E)$ 。实际上对于所有的 GPR 实测试验而言,这些张量都视为是与场无关的标量。换句话说,物质材料在外加场作用下的响应是和外加场同一方向的且与场强度无关。尽管这些近似仅在极少数情况下才完全适用,但到目前为止,GPR 实地探测应用中极少能顾及到类似张量和非线性等如此复杂的分析。

物质属性参数同时也受到外部前时入射场的支配。前时入射场有如下表征:当物质材料中的电荷充电具有有限响应时间时,其对外部慢速的场变化体现出似稳特征,而对外部快速的场变化体现出自由运动特征。严格意义上讲,式(1.5)至式(1.7)都应该写为如下形式[以式(1.5)为例]

$$\mathbf{J}(t) = \int_0^{\infty} \tilde{\sigma}(\beta) \cdot \mathbf{E}(t - \beta) d\beta \quad (1.8)$$

当媒质材料的物理属性呈现出色散态时,必须采用上述复杂形式的本构方程。而对绝大多数 GPR 应用来说,假定 σ 、 ε 和 μ 为一标量常数已经足以满足探测要求,其中前两个参数是尤为重要的。

在 GPR 领域,通常采用相对介电常数的概念,定义如下

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1.9)$$

式中 ε_0 为真空的介电常数,为 8.89×10^{-12} F/m。

1.2.4 物质属性参数

关于物质电参数(σ 、 ε 和 μ)的描述是一个相当宽泛的课题,这方面的详细材料可参考 Olhoef(1981, 1987)和 Santamarina et al. (2001)。此处仅限于基本问题的分析。在 GPR 应用中, σ 和 ε 是最为关注的两个参数,而 μ 参数通常情况下不予考虑。

GPR 技术在低损耗媒质中的应用尤为广泛。当 $\sigma = 0$ 时,GPR 的入射信号可以穿透到很深的深度,也就扩展了其应用范围。在实际应用中,低损耗探测环境也并非常见。如在黏土环境或富含盐的地下水环境中,GPR 的穿透深度就相当有限了。

GPR 实地探测时的媒质材料是典型的地球媒质,都包含了多种其他物质或成分。水和冰是为数不多的单一媒质材料的例子。常见的海滨沙滩就是土壤颗粒、空气、水和水溶离子的混合物,其中土壤颗粒通常占到 60%~80% 的比例。理解混合物的物理属性是实现 GPR 数据解译的关键环节。

混合物的物质属性通常并不是各组成成分属性的等比例加权求和。多数情况下,在没有辅助信息的前提下基本上是不可能对混合物的物质属性进行定量分析的。尽管如此,GPR 探测目标的粗略分类还是可以实现的。

在 10~1000 MHz 的频谱范围内,物质材料中水成分的有无对材料的电磁属性起着决定性的作用。GPR 应用中,粗略地将目标电磁数据特征概括如下:

- 大块矿石通常是良好的绝缘体,相对介电常数在 3~8 的范围内(取决于成矿机理和密实程度),电导率为零。
- 土壤、岩石和建筑物等材料中间有孔隙,可能填充空气、水或其他材料。
- 水易于极化,相对介电常数 κ 高达 80。
- 微孔中的水通常包含有离子成分,离子的活性是决定块状空隙材料电导率的主导因素。土壤和岩石的电导率典型值在 1~1000 mS/m 范围内。
- 水在自然物质材料中是常有的成分,对物质材料的电参数起决定作用。

Topp 方程(Topp et al., 1980)和 Archie 定律(Archie, 1942)的经验关系式通常用来描述土壤的介电常数、电导率和含水量之间的关系。基于 BHS 模型(Sen et al., 1981)的高级关系式采用有效媒质理论模型得到了多成分物质材料电磁属性的综合表达式。详细内容可参考相关文献。

1.3 电磁场的波动特征

GPR 是利用电磁场的波动特征进行目标探测的。当场随时间变化时,麦克斯韦方程组[参见式(1.1)至式(1.4)]描述了互耦的电场和磁场的变化关系。根据能量损耗(和电导率有关)和能量存储(和介电常数和磁导率有关)的相对强度大小,波场呈现出凋落和波动特性。当探测环境具有类波场响应时,GPR 探测是有效的。

当消去电场或磁场分量,重新改写麦克斯韦方程组时,电磁场的波动特性变得明显。这里运用电场表述,重新写为

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ \text{A} & \text{B} & \text{C} \end{matrix}$

(1.10)

在低损耗媒质中,能量耗散(B分量)与能量存储(C分量)相比较小,GPR 能够实现有效探测。

上述方程的求解可参见图 1.3。电场和磁场方向相互正交,且与传播方面 \mathbf{k} 正交。

在 GPR 应用中,电场分量通常是测得量,可表示为如下形式

$$\mathbf{E} = f(\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}, t) \hat{u} \quad (1.11)$$

式中 \mathbf{r} 表示空间矢量, $f(\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}, t)$ 服从标量方程