

高等学校教材



探地雷达原理与应用

曾昭发 刘四新 冯 晷 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校教材

探地雷达原理与应用

曾昭发 刘四新 冯昶 等编著
鹿琪 王者江 薛建 参编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

探地雷达是用高频无线电波来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理方法,它利用宽带电磁波以脉冲形式来探测地表之下的或确定不可视的物体或结构。经过几十年的发展,探地雷达逐渐趋于成熟,且由于具有高分辨率、高效率等优点,因而广泛应用于工程、环境和资源等浅部地球物理领域,取得了很好的效果。本书介绍了探地雷达的基本原理、天线、系统、测量方法与技术、数据处理、解释与模拟及其在不同领域中的应用。全书共分为两部分,第一部分主要介绍探地雷达的理论、方法与技术,第二部分主要介绍探地雷达的应用。

本书是在充分吸收国内外研究成果的基础上编著而成的,目的是以教学的用书形式,为在校大学生和从事探地雷达研究与应用的工程技术人员提供一本内容详细的教材或参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

探地雷达原理与应用 / 曾昭发等编著. —北京:电子工业出版社,2010.10
高等学校教材

ISBN 978-7-121-11907-1

I. ①探… II. ①曾… III. ①雷达探测—电磁法勘探—高等学校—教材 IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 188517 号

策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平 特约编辑:王 崧

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:

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:21.75 字数:598 千字

印 次:2010 年 10 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 是用高频无线电波来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理方法, 它利用宽带电磁波以脉冲形式来探测地表之下的或确定不可视的物体或结构。探地雷达是一种较新的地球物理方法, 20 世纪 90 年代以后逐渐成熟。探地雷达的发展和成熟既伴随着各种各样的探测应用, 同时又得到高新技术发展的推动。

探地雷达的发展大致可以分为三个阶段, 即发明阶段 (1904—1930)、发展阶段 (1930—1980) 和成熟阶段 (1980—目前)。早在 1910 年, 德国人 Letmbach 和 Löwy 就在一份德国专利中阐明了探地雷达的基本概念。Hdlsenbeck (1926) 第一个提出应用电磁脉冲技术探测地下目标物, 他指出介电常数变化界面会产生电磁波反射。最早利用脉冲电磁波技术重复获得地下介质的探测结果出现在 1961 年美国空军的报告中。由于地下介质比空气具有更强的电磁能量衰减特性, 加之地质情况的复杂性, 电磁波在地下的传播要比空气中的传播复杂得多。因此, 探地雷达应用初期, 仅限于对电磁波吸收很弱的冰层、岩盐等介质的探测。

登月和对月球探测的需要, 使得人们开始重视使用脉冲电磁波来探测地下介质这一研究课题, 主要原因在于探地雷达在这一领域的应用具有明显的优越性, 即能利用发射的电磁波对介质内部进行遥测。20 世纪 70 年代以后, 随着电子技术的发展及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、灾害地质勘察、岩土工程调查、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。同时, 很多专家出版了多本关于探地雷达的专著, 如 L. B. Conyers 于 1997 年撰写的 *Ground Penetrating Radar for Archaeology*; D. Daniels 于 2007 年撰写的 *Ground Penetrating Radar*; Harry M. Jol 于 2009 年撰写的 *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* 等, 这些探地雷达书籍为广泛推广探地雷达技术作出了重要贡献。

在我国, 探地雷达的研究和应用也逐渐趋于成熟。应用地球物理专家、仪器系统制造专家和其他领域应用探地雷达的专家, 都熟悉了探地雷达的性能, 并具备了解决问题的能力。1994 年由李大心教授编著的《探地雷达方法与应用》, 为推动探地雷达在我国的发展与应用具有重要的作用。探地雷达在我国稳步发展, 20 世纪 90 年代发表的探地雷达相关文章数量呈直线上升。进入 21 世纪, 探地雷达出现了稳定发展的趋势。2006 年, 曾昭发等编著了《探地雷达原理及应用》, 较为系统地就理论和方法进行了介绍。2006 年, 栗毅、黄春琳等出版了《探地雷达理论与应用》; 2007 年, 耿玉岭、贾学民等出版了《公路路面无损检测中的探地雷达研究》; 杨峰于 2009 年和 2010 年分别出版了《公路路基地质雷达探测技术研究》和《地质雷达探测原理与方法研究》, 等等。经过这些年的发展, 探地雷达的应用实践逐渐增加, 应用探地雷达的领域也逐渐增加。

以教育为主要目的, 进一步对国内外相关的书籍和应用实例进行总结, 并根据我们在多年来的应用实践基础上, 以教材的形式编著了本书, 并在每一章的后面增加一些思考题, 供读者自学和复习参考。

本书是在充分吸收国内外研究成果的基础上编著而成的, 目的是为广大探地雷达应用人员和相

关技术人员、在校高年级大学生、研究生提供一本教学参考书。在本书的撰写过程中，曾昭发教授完成了第1章~第6章、第9章全部和第7章与第11章、第12章的部分撰写工作，刘四新教授完成了第7章与第10章和第11章的撰写工作；冯晖教授完成了第14章和第18章全部和第17章部分的编著工作；王者江副教授完成第8章的编写工作；鹿琪副教授完成第16章全部和第17章的部分编写工作；薛建高级工程师完成了第11章~第15章的撰写。全书由曾昭发、刘四新统稿。

作者在进行探地雷达的研究和本书的撰写过程中，挪威地质工程公司(NGI)的孔凡年教授、日本东北大学的佐藤源之教授给予了诸多的帮助和指导；在撰写过程中，中国科学院方广有研究员、吉林大学林君教授给予了指导，并阅读了部分稿件，提出了修改意见。浙江大学田钢教授为本书的撰写提供了大量有益的建议，同时还参与了其中许多实例的野外和室内工作。在图形的制作和清绘过程中，黄航、贾建秀两位老师付出了辛勤的劳动。本书成稿以后，国电昆明勘查设计研究院的曾宪强、张志清，华南物探公司孟凡强等，提供了大量的建议。书中一定还有许多不妥或错误之处，请专家批评指正。

编 者

2010年9月于吉林大学

目 录

第 1 章 探地雷达起源及特点	1
1.1 探地雷达的基本概念	1
1.2 探地雷达的发展历史	1
1.3 探地雷达的优越性	5
1.4 探地雷达的局限性	6
1.5 探地雷达的发展趋势	6
1.6 探地雷达的应用	7
习题	8
参考文献	8
第 2 章 探地雷达的电磁基础	12
2.1 电磁波传播的基本规律	12
2.1.1 电磁波谱	12
2.1.2 麦克斯韦方程组	13
2.1.3 本构关系	14
2.1.4 探地雷达方法中电磁波的波动性	15
2.1.5 电磁波的横波性质	16
2.1.6 能流密度矢量	17
2.1.7 电磁位函数	18
2.2 平面电磁波	19
2.2.1 理想介质中的平面波	20
2.2.2 导电媒介中的平面波	24
2.2.3 平面波的极化	28
2.2.4 平面波的反射和透射	30
2.2.5 多层介质表面的正入射	37
2.2.6 电磁散射	39
2.2.7 色散和群速	42
习题	43
参考文献	43
第 3 章 介质的电性质及对电磁波传播参数的影响	44
3.1 介质的电性参数	44
3.1.1 介质的电导率	44
3.1.2 电介质的极化和介电常数	44
3.1.3 矿物的电性质	45

3.1.4	岩石的电导率与介电常数	46
3.1.5	土壤的电导率和介电常数	49
3.1.6	植被的介电常数	50
3.1.7	永久冻土的电性参数	51
3.1.8	人造介质的电性参数	51
3.2	介质电性参数和介质电性参数模型	52
3.2.1	介质介电常数与电磁场频率关系	52
3.2.2	探地雷达平台	53
3.2.3	混合介质的介电常数模型	54
3.2.4	介质的介电常数模型	55
3.3	电磁波传播参数与介质电性质的关系	57
3.3.1	电性参数对相速度的影响	57
3.2.2	电性参数对衰减系数的影响	59
	习题	60
	参考文献	60
第 4 章	探地雷达仪器系统和工作方法	62
4.1	探地雷达仪器和参数	62
4.1.1	探地雷达系统的信号调制方式	63
4.1.2	探地雷达系统的主要设计参数	65
4.2	时间域探地雷达	67
4.2.1	时间域探地雷达的基本原理	67
4.2.2	GSSI 的 SIR 仪器系列的构成和技术指标	68
4.2.3	加拿大 EKKO 系列探地雷达	69
4.2.4	RAMAC/GPR 探地雷达系统	70
4.2.5	中国电波传播研究所 LTD-2100 探地雷达	70
4.3	FMCW 探地雷达	72
4.3.1	FMCW 雷达探测的基本原理	72
4.3.2	FMCW 探地雷达	74
4.4	步进频率探地雷达	78
4.4.1	步进频率探地雷达系统的基本原理	78
4.4.2	步进频率探地雷达系统设计方案	79
4.4.3	步进频率探地雷达实验系统	80
4.5	脉冲探地雷达和步进频率探地雷达的比较	81
	习题	82
	参考文献	83
第 5 章	探地雷达天线	85
5.1	天线基本元的辐射	85
5.1.1	近场区	86
5.1.2	远场区	87

5.1.3	中间区	88
5.2	天线的基本参数	89
5.2.1	效率	89
5.2.2	输入阻抗	90
5.2.3	辐射方向图(波瓣图)	90
5.2.4	方向系数	91
5.2.5	极化	92
5.2.6	增益系数	92
5.2.7	有效长度	93
5.2.8	工作频带宽度	94
5.2.9	天线的屏蔽	94
5.2.10	接收天线的电参数	95
5.3	探地雷达的天线类型及辐射形式	95
5.3.1	天线在探地雷达系统中的作用	95
5.3.2	简单的探地雷达辐射系统——线天线	96
5.3.3	从线性天线到圆锥形天线、领结形天线、圆柱形天线	98
5.4	常见探地雷达天线	99
5.4.1	5100 型天线	100
5.4.2	3101D 型天线	100
5.4.3	5103 型天线	101
5.4.4	5106 型天线	101
5.4.5	3207 和 3207A 型天线	102
5.4.6	3200 MLF 型低频天线	102
5.4.7	Subecho-40 和 Subecho-70 天线	102
5.4.8	4108 型角形天线	103
	习题	103
	参考文献	103
第 6 章	探地雷达工作方法	104
6.1	探地雷达的测量方式	104
6.1.1	反射测量方式	104
6.1.2	折射测量方式	107
6.2	探地雷达野外测量设计	108
6.2.1	探地雷达适用性评价	108
6.2.2	目标体特性和测量参数选择	112
6.3	探地雷达野外资料评价与注意事项	118
6.3.1	资料的验收	118
6.3.2	实测中的注意事项及干扰消除方法	118
	习题	119
	参考文献	120

第 7 章 探地雷达的数值及物理模拟	120
7.1 射线追踪法	121
7.1.1 计算方法原理	121
7.1.2 收敛性问题	124
7.1.3 雷达波的衰减问题	124
7.1.4 数值模拟计算	124
7.1.5 应用实例	125
7.2 有限元法	126
7.2.1 雷达波和地震波之间运动学规律的对比	127
7.2.2 雷达波有限元正演模拟的实施	128
7.2.3 数值模拟	129
7.3 时间域有限差分法	131
7.3.1 FDTD 基本原理	131
7.3.2 解的稳定性及数值色散	137
7.3.3 吸收边界条件	141
7.3.4 FDTD 中的常用激励源	143
7.3.5 计算实例	149
7.4 模型实验	152
习题	156
参考文献	156
第 8 章 探地雷达数据处理	156
8.1 资料整理、数据处理技术要求	156
8.2 数据编辑	157
8.2.1 数据合并	157
8.2.2 废道剔除	157
8.2.3 测线方向一致化	157
8.2.4 漂移处理	157
8.3 常规处理	159
8.3.1 数字滤波的原理	159
8.3.2 反滤波(反褶积)	161
8.4 偏移处理	170
8.4.1 偏移归位的概念	170
8.4.2 绕射扫描叠加	171
8.4.3 相移偏移方法	171
8.4.4 基尔霍夫积分偏移方法原理	174
8.5 雷达图像的增强处理	175
8.5.1 振幅恢复	175
8.5.2 道内均衡	176
8.5.3 道间均衡	176

习题	177
参考文献	177
第 9 章 探地雷达数据解释	177
引言	177
9.1 探地雷达数据解释基础、流程和波形识别	178
9.2 典型目标体探地雷达异常特征	178
9.3 时间剖面的解释方法	182
9.3.1 反射层的拾取	182
9.3.2 时间剖面的解释	183
9.3.3 雷达波速度的求取	184
9.4 属性解释	187
9.5 频散介质一维反演	188
9.5.1 最小二乘反演方法的基本原理	189
9.5.2 反演算例	190
习题	192
参考文献	192
第 10 章 钻孔雷达	193
10.1 钻孔雷达的发展历史及现状	194
10.2 钻孔雷达的测量方式	194
10.2.1 单孔反射测量	196
10.2.2 跨孔测量	197
10.2.3 跨孔反射分析	197
10.2.4 层析成像分析	198
10.2.5 井-地测量 (Surface-Borehole Survey)	198
10.3 钻孔雷达的数据处理	200
10.4 钻孔雷达的应用实例	209
10.4.1 南非深部金矿的探测	209
10.4.2 加拿大镍-铜矿的应用研究	211
10.4.3 确定煤层采空区	213
10.4.4 冰川学研究	215
10.4.5 水文地质特征	215
10.4.6 地下裂缝分布的探测	217
习题	220
参考文献	220
第 11 章 机载探地雷达	222
11.1 发展历史及现状	222
11.2 仪器系统及应用	227
习题	229

参考文献	229
第 12 章 工程探测应用	229
12.1 公路工程探测领域	229
12.1.1 公路病害检测	230
12.1.2 公路结构层厚度检测	233
12.1.3 掌子面前方地质超前预报	235
12.1.4 隧道衬砌质量检测	238
12.2 水利工程探测领域	242
12.2.1 堤坝蚁巢、洞穴的探地雷达探测	243
12.2.2 水坝渗漏通道探测	243
12.2.3 水下工程隐患探测	245
12.2.4 江堤滑塌成因探测	245
12.3 电力工程探测领域	246
12.3.1 不良地质现象探测	246
12.3.2 岩性界面划分	248
12.3.3 核电站选址勘察	249
12.3.4 灰坝渗漏探测	250
12.3.5 水电站坝基隐患探测	253
12.4 城市建设工程领域	254
12.4.1 地下管线探测	254
12.4.2 地下建筑结构物探测	255
习题	255
参考文献	256
第 13 章 水文地质领域	256
13.1 河道探测	256
13.1.1 古河道探测	256
13.1.2 河道堵塞现状探测	259
13.2 潜水面探测	260
13.3 水深探测	261
13.4 冻土层探测	262
13.5 落水洞探测	264
13.6 水下结构物探测	265
13.7 地下水污染探测	267
习题	269
参考文献	269
第 14 章 环境地质应用	269
14.1 地下岩溶探测	270
14.1.1 城市区域岩溶探测	270

14.1.2 铁路路基地下岩溶探测	271
14.2 采空区与洞穴探测	272
14.2.1 采空区探测	272
14.2.2 土洞与人防工程探测	274
14.3 滑坡探测	275
14.4 地裂缝探测	277
14.5 活动断层的探测与评价	278
14.6 垃圾掩埋场地选址与调查	280
14.7 地下废弃物调查	281
14.8 油气污染的监测	282
习题	283
参考文献	283
第 15 章 土壤和农业领域	283
15.1 测定土壤含水量	283
15.2 土壤层与基岩层深度探测	286
15.3 碱化层厚度探测	287
15.4 洪积扇区砾石层厚度探测	291
15.5 土壤污染探测	292
习题	293
参考文献	294
第 16 章 考古探测应用	294
16.1 遗址勘查	295
16.1.1 日本群馬县浮石层下的遗址构造调查	295
16.1.2 古矿坑遗址探测	296
16.2 古墓勘查	297
16.2.1 日本南九州地下横墓穴	297
16.2.2 西都原古坟群第 100 号坟	299
16.2.3 西都原古坟群第 111 号坟	302
16.3 文物保护	303
16.3.1 古塔结构探测	303
16.3.2 云冈石窟维护探测	305
习题	305
参考文献	306
第 17 章 极地探测和星球探测应用	307
17.1 高山冰川	308
17.2 极地积雪	309
17.3 冰碛地层	310
17.4 冰架	311

17.5 裂隙	311
17.6 星球探测	312
17.6.1 月球探测	312
17.6.2 火星探测	314
习题	315
参考文献	315
第 18 章 地雷和未爆炸弹探测	316
18.1 地雷和未爆炸弹	316
18.1.1 地雷	316
18.1.2 未爆炸弹 (UXO)	317
18.2 地雷和未爆炸弹探地雷达响应特征	317
18.2.1 极化特征	318
18.2.2 埋藏环境影响	320
18.2.3 杂波影响	320
18.3 专用探地雷达系统设计	321
18.3.1 工作频带	321
18.3.2 天线系统	322
18.3.3 系统稳定性	323
18.4 信号处理和成像	323
18.4.1 处理流程	323
18.4.2 探地雷达测量地表地形	326
18.4.3 多次覆盖提高信杂比	329
18.4.4 偏移成像	329
习题	331
参考文献	331

第1章 探地雷达起源及特点

1.1 探地雷达的基本概念

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 是用高频无线电波来确定介质内部物质分布规律的一种探测方法。探地雷达方法具有许多名称, 如地面探测雷达 (Ground-probing radar)、地下雷达 (Subsurface radar)、地质雷达 (GeoRadar)、脉冲雷达 (Impulse radar)、表面穿透雷达 (Surface penetrating radar) 等, 都是指利用宽带电磁波以脉冲形式来探测地表之下或确定不可视的物体内部或结构, 探地雷达是目前应用比较广泛的名称。它是一种较新的探测方法, 在 20 世纪 90 年代以后逐渐成熟起来。探地雷达的发展得到高新技术发展的推动, 同时又受益于各种各样的应用, 其应用逐渐超出“探地”的范畴。

探地雷达采用高频电磁波进行探测, 频率范围一般分布在 1 MHz~10 GHz 之间。早期探地雷达的频率范围主要在 1~1000 MHz 之间, 随着宽带技术、超宽带技术的发展, 其频带范围逐渐扩大, 甚至与 SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达) 技术结合在一起, 形成 SAR-GPR 技术 (Nguyen, 2009)。

探地雷达的探测系统包括发射天线和接收天线, 以及控制收发和数据存储的控制系统。由于天线的频带范围的控制, 一般不同的天线具有不同的频率范围, 也控制着探测目标的探测深度和分辨率。探地雷达采用较低频率和较窄带宽电磁波进行探测, 获得的探测深度较大, 分辨率相对较低; 反之, 探地雷达采用较高频率和宽带频率范围电磁波进行探测, 探测深度浅, 但能获得相对较高的分辨率。

探地雷达探测中一般以电磁脉冲的形式进行探测, 脉冲在介质中的传播遵循惠更斯原理、费马原理和斯涅尔定律, 发生反射、折射等现象, 其运动学规律与地震勘探方法相似 (见图 1.1)。这也是地震数据采集、处理和解释方法技术广泛应用于探地雷达的基础。

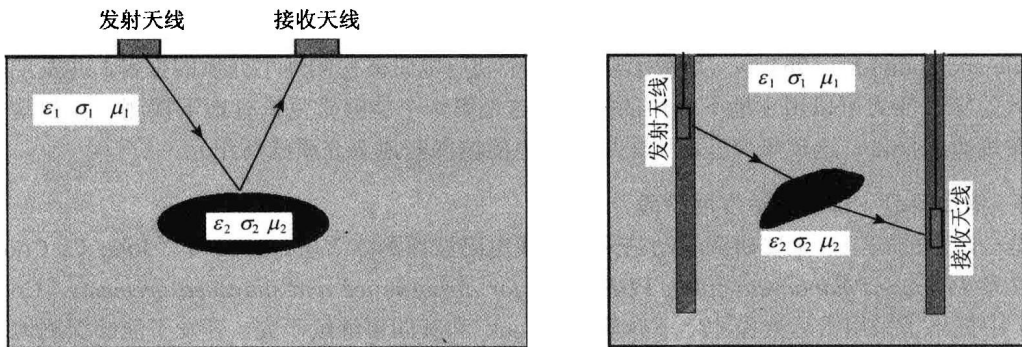


图 1.1 探地雷达反射或散射探测和透射探测方法原理示意图

1.2 探地雷达的发展历史

探地雷达的发展大致可以分为三个阶段, 即发明阶段 (1900 年—1960 年)、发展阶段 (1960

年—1980年)和成熟阶段(1980年—目前)。

在第一个阶段,主要成就是提出了采用电磁波进行地下探测的概念,并阐明了其可行性,开展了简单的试验。第二个阶段的主要成就是研究出了探地雷达系统,并逐步将探地雷达系统在低耗介质中的探测发展到有耗介质的探测,建立了电磁波脉冲完成地下探测的基本理论。在第三个阶段,探地雷达进行地下探测的机理清楚,建立了从数据采集、数据处理和解释的方法技术,广泛地开展探地雷达的应用,取得了非常好的探测效果,成为一种成熟的探测技术。

根据出版的文献(Annna, 2002),这里介绍一下探地雷达的发展历史。

1. 第一阶段 探地雷达发明阶段

麦克斯韦(James Clerk Maxwell)于1864建立了电磁波传播基本理论。赫兹(Heinrich Hertz)于1886建立了电磁波反射的基本理论。1924年,英国物理学家Edward Victor Appleton采用电磁反射波估计了电离层的高度,这成为电磁波进行探测的第一个成果。1935年,英国物理学家Robert Watson-Watt开发了第一台雷达系统,成为第一个电磁探测系统。英国加入第二次世界大战后,在英国南部和东部海岸建立了雷达网络来探测敌人的舰船和飞机(Calligeros, Hehir, and Jacobs 网站)。这一时期关于无线电波的传播规律的研究,主要集中在地面之上或沿地表传播方面,主要应用目标是军事领域的目标。

1904年,Hulsemeyer首次尝试用电磁波信号来探测远距离地面金属体,它就是探地雷达的雏形。早在1910年,德国人Letmbach和Löwy在一份德国专利中阐明了采用电磁波探测地下介质的基本概念。Hdlsenbeck(1926)第一个提出应用电磁脉冲技术探测地下目标物,并指出介电常数变化界面会产生电磁波反射。

根据Gary R. Olhoeft(见网站www.g-p-r.com)搜集的资料,第一次开展探地雷达测量是1929年德国地球物理学家W. Stern,他利用电磁波脉冲在奥地利探测冰川的深度。之后,利用电磁波探测地下介质一直被遗忘。

1951年,B. O. Steenson用雷达探测了冰川的厚度。之后,El Said(1956)尝试利用空气直达的信号和地下水水面反射信号进行干涉,来获得地下水位的深度,出现了第一个利用无线电波探测有耗介质的报告和论文。但这一时期电磁波在地下介质中的传播规律研究取得了较大的进展(J. Wait, 1955),但频率较低,用于较大深度的电磁探测。

20世纪50年代末,美国空军的飞机在格陵兰冰层上降落时,由于高度计出现误差而坠毁(Waite and Schmidt, 1961),从而出现了第二个利用电磁波探测地下介质的报告,并发现电磁波有效的穿透能力可以用于地下介质的探测。这是第一个能够重复进行地下探测而获得地下介质分布规律的报告。这项研究开辟了采用无线电电磁波探测地下介质的新纪元。

2. 第二阶段 探地雷达发展阶段

这一阶段的初期,主要研究活动是采用无线电电磁波探测冰雪层。1960年,John C. Cook在他的文章*Proposed monocycle-pulse, VHF radar for airborne ice and snowmeasurements*(Cook, 1960)中提出了采用雷达波探测地下介质层。Cook和其同事继续研究,开发了能够探测地下介质的雷达系统(Moffatt and Puskar, 1976),主要工作目标区集中在极圈附近。研究小组包括剑桥的Scott极地研究所,威斯康星大学的Bailey等(1964),地球物理和极圈研究中心的研究人员,以及Bentley(1964)和Walford(1964)等。20世纪60年代后期,麻省理工学院(MIT)为美国部队研究出一套探地雷达系统,应用于美国军队在越南进行地下坑道探测。

1965年—1970年期间,在冰层的探测工作继续进行的同时,研究工作扩展到利用无线电磁

波探测一些其他低耗介质,如探测煤矿(Cook, 1973)和探测盐矿(Holser et al., 1972; Unterberger, 1978 和 Thierbach, 1973)。

这一时期开始了“阿波罗”计划的研究工作。月球表面的介质是低损耗介质,因而开展了采用电磁波探测月球介质的实验(Annan, 1973)。

1967年,一个与Stern的冰层探测仪相似的系统被开发出来,并搭乘在阿波罗17号上,对月球进行探测。在20世纪70年代之前,还没有商业的探地雷达系统,只有研究单位开发的探测系统。

1970年—1975年期间,探地雷达出现了巨大的进展。阿波罗17号月球探测计划中,采用相干的探测方式,在月球轨道完成了月球表面介质电性的探测实验(Simmons, et al., 1973; Ward, et al., 1973)。

Moffatt and Puskar(1976)提供了最原始也最实用的探地雷达系统,系统采用改良天线,并在地下层面的探测中获得较好的信噪比,并应用该系统进行了多项探测,如探测地下坑道、断层和矿产等。在利用该系统探测土壤含水量时,获得了探地雷达成功应用于探测地下岩石和土壤的异常和变化的实例。1970年,Harison在南极冰层上,取得了800~1200 m穿透深度的资料;1974年,Unterberger R. R.开展了盐矿夹层探测等实验。

1972年, Rex Morey 和 Art Drake 建立地球物理测量系统公司(Geophysical Survey Systems Inc.),并开始销售商用探地雷达系统,这标志着探地雷达的快速发展和广泛应用。

在理论研究上,Olhoeft(1975)的研究成果成功地阐明了在无线电波频段上,地质介质的电性变化规律,以及介质的电导率和介电极化之间的关系。

1975年—1980年期间,由于探地雷达仪器设备的出现和理论研究的成果,探地雷达的应用领域逐渐扩大。例如,加拿大在地质调查(Annan and Davis, 1976)中,采用探地雷达测量结果确定加拿大北极圈附近的永冻区地层的分布情况,解决了自加拿大北极圈到南部的石油天然气运输管道在冻结土壤环境地区的工程施工问题。同时,美国将探地雷达应用于阿拉斯加地区的石油天然气管道的选线工作。

Moffatt and Puskar(1976)还提供了探地雷达基本理论和地下介质的电磁波速度的计算方法。Ulriksen(1982)和其他研究者提出了处理和分析探地雷达数据的方法技术。然后,Wyatt, Waddell, and Sexton(1996)介绍了探地雷达的数据采集、数据处理和分析的简单流程。

这期间,更加清楚研究了采用无线电磁波的散射探测冰川的理论机制。Watts and England(1976)提出了散射机理和采用低频雷达进行探测的方法技术。斯坦福大学研究所报告了采用探地雷达在考古学方面的应用(Dolphin et al., 1978)。

在加拿大的西部,探地雷达成功应用于钾矿的勘查(Annan, 1988)和煤矿的开发应用(Coon et al., 1981)。Davis and Annan(1986)采用井中雷达探测核废料埋藏处的岩石质量问题。

这期间,探地雷达的商业仪器获得了广泛的应用,也表现出巨大的潜在发展空间。GSSI 仍然是唯一的探地雷达供应单位,但Ensco/Xadar开始研究并生产探地雷达。

在这一时期的探地雷达的应用实践中,由于仪器笨重、体积大、耗电量大,很难利用这些探地雷达设备进行长距离探测或遥远地区探测。数据处理也主要采用石油勘探中的地震数据处理方法和软件。

3. 第三阶段 探地雷达的成熟阶段

这一阶段初期,许多预想采用探地雷达能取得较好效果的领域,实际情况表明其环境并不适合探地雷达的应用,致使人们对探地雷达的研究和应用兴趣减弱。一些研究集中于分析这种

不适用性是仪器原因还是介质的响应原因。

日本的 OYO 公司与 Xadar 联合开发了 Georadar 探地雷达产品。这种仪器在欧洲取得了成功。

A-Cubed 公司成立于 1981 年, 并开始开发探地雷达。Davis et al. (1985) 开发成功了低频数字探地雷达。他是 Pulse EKKO 探地雷达系列的前身。

瑞典地质调查局进行了钻孔雷达的开发研究 (Olsson et al., 1987), 目的是评价核废料的处理中地下介质的完整性和水文地质特性。

Ulriksen (1982) 提供了探地雷达应用于道路探测和埋设的管线探测的成功实例。同时, 许多非商业的开发者在研究便携式、数字记录、光缆传输的探地雷达系统。

美国军队和西南研究所研究了采用钻孔雷达探测军事敏感地区的地下坑道方面的内容 (Owen, 1981)。

探地雷达的成熟标志是对探地雷达的优势和缺点得到很好的理解。同时, 近地表的问题研究促进了对高分辨率探测结果的需求。探地雷达是具有最高分辨率的地球物理方法, 美国环境保护机构立项对污染的土地进行调查和清理 (Benson et al., 1984), 也极大地促进了探地雷达的发展。

由于出现了更低频率、全数字化的探地雷达产品, 也促进了探地雷达的发展, 已有的应用领域还在继续扩大的同时, 开辟了许多新的应用领域, 如农业上土壤的分类 (Doolittle and Asmussen, 1992)、无损检测及生物体的探测。地震勘探中的数值模拟方法也应用于探地雷达 (Annan and Chua, 1992) 的模拟, 从而可更好地分析目标体的异常响应。

1988 年, 探头和软件公司从 A-Cubed 公司中分离出来, 着手 Pulse EKKO 探地雷达的开发和生产。

1990 年—1995 年期间, 迎来了探地雷达的一个新的高潮。世界上许多的研究机构从事这一方面的研究。

在商业领域, GSSI 公司取得了巨大的商业利益, 并被日本的 OYO 公司收购。Mala Geoscience 从瑞典地质调查局分离出来, 进行探地雷达的开发和生产; 英国的 ERA 在未爆炸物 (UXO) 和地雷探测领域的研究更加活跃。探头和软件公司成长非常快, 并在世界范围销售其 Pulse EKKO 产品。

在研究方面, 地球物理和电子工程领域的专家更加注重这一领域的研究, 出现了多道采集 (Fisher et al., 1992)、数字处理 (Majjala, 1992; Gerlitz, et al., 1993)、二维数字模拟 (Zeng et al., 1995; Cai and McMechan, 1995) 等。Roberts and Daniels (1996) 开始研究三维数字模拟。探地雷达的应用逐渐向考古学 (Goodman, 1994)、环境 (Brewster and Annan, 1994) 和地质调查 (Jol, 1996) 以及一些新的领域扩展。环境领域应用的钻孔雷达开发也取得了较好的成果 (Redman et al., 1996)。

每两年举行的探地雷达国际会议也更加规范, 极大促进了探地雷达的交流和发展。

1995 年—2000 年期间, 计算机的发展推动了探地雷达的巨大进步。探地雷达的全三维数字模拟更加盛行, 虽然计算量仍然很大 (Holliger and Bergmann, 2000; Lampe and Holliger, 2000)。由于计算机的发展, 存储、处理大量数据非常容易实现, 这使得进行三维探地雷达测量并对地下介质进行成像和实现三维可视成为可能 (Grasmueck, 1996; Annan et al., 1997)。由于市场的需要, 生产了大量不同类型的探地雷达, 即探地雷达向专业化领域发展。同时, 世界上出现了许多实力较强的研究小组。

另一个进展是全极化探地雷达系统 (Roberts and Daniels, 1996) 和 GPS 一体化的探地雷达