



“岩土工程”学科科学传播丛书

探地雷达地质探查 及检测技术

TANDILEIDA
DIZHITANCHA JI JIANCEJISHU

钟世航 孙宏志 杨峰 刘杰 王荣
编著



上海科学技术出版社

“岩土工程”学科科学传播丛书

探地雷达地质探查及检测技术

钟世航 孙宏志 杨 峰 刘 杰 王 荣 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了探地雷达在浅层地质勘查、铁路路基探查、公路道路探测、隧道衬砌质量检测以及在隧道施工地质预报等方面的典型实例。

全书共分6章:第1章对探地雷达进行了概述,介绍了其方法原理和解释原理,以及应用和发展;第2章阐述了有耗媒质中的电磁波的传播特性,特别指出了被探查介质的电导率(电阻率)对雷达波的影响,其中也包括对波速的强大影响;第3章和第4章介绍了探地雷达在浅层地质探查、路基探查和检测、公路道路检测探查中的应用,还介绍了探地雷达处理软件的相关内容和操作;第5章介绍了探地雷达在隧道衬砌质量检测方面的应用及现场进行地质探查的工作方法;第6章则从介电常数和电导率对雷达波的影响方面讨论了用探地雷达探水的理论和实践。

本书可供使用探地雷达的科研、设计、施工、管理、监理、检测等部门的技术人员作参考,也可作为有关专业的高校学生和培训班及科普继续教育传播的教材。

图书在版编目(CIP)数据

探地雷达地质探查及检测技术 / 钟世航等编著. —
上海:上海科学技术出版社,2016.1
(“岩土工程”学科科学传播丛书)
ISBN 978-7-5478-2909-7

I. ①探… II. ①钟… III. ①探地雷达—应用—地质
勘探 IV. ①TN959.1②P62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 277250 号

探地雷达地质探查及检测技术

钟世航 孙宏志 杨峰 刘杰 王荣 编著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路193号 www.ewen.co

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10

字数 154千字

2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-2909-7/TN·18

定价:88.00元

前 言

近 30 年来,探地雷达技术在地质探查和岩土工程质量检测中被广泛应用,在岩土工程的设计、施工、验收等不同阶段发挥了较大的作用。

本书的第 1、2 章是概论和有关电磁波的传播理论,第 3~6 章是在各方面的应用成果和经验。理论部分是作者针对探地雷达应用的需要摘编了相关基础理论知识而成,而应用部分则汇集了作者亲身实践的近 100 余个岩土工程的技术服务生产项目资料,以及其他有关探地雷达在解决探查工作中的问题的技术资料;特别是书中大量的实测资料、图片均是各位作者长期的实践应用积累,可为大多数探地雷达技术应用工作者提供一定的借鉴和帮助。

本书 5 位作者中有 4 人是中国岩土力学与工程学会“岩土工程”学科科学传播团队的专家。本书作者在百忙中编写本书与大家分享,希望本书能给从事本行业工作的技术人员提供更多的信息交流和有利借鉴。由于篇幅有限,作者的工作范围也不可能包括探地雷达方方面面的应用,即使引用了一些古建筑物地下遗址的资料,也不能反映古遗址探查的全面情况,但大量的实测结果也可直接、间接地提供参考。

本书的部分内容已被列入铁路高新技术应用技术培训班的教材;由国家级专业技术人员继续教育基地、中国铁道科学研究院继续教育培训中心、铁道科学研究院铁道建筑研究所、铁路继续教育高新技术基地共同组织举办过多期探地雷达技术应用培训班,每届 2~4 天,均受到了广大学员们的欢迎。本书的各位作者在与学员互动和答疑过程中,不断修改和补充讲稿,从而形成了本书。

本书中理论阐述部分和一些章节论述的内容,参考或摘引包括各位作者

发表的一些书刊及论文中的内容,已在正文后面的参考文献目录中列出。本书大部分的实测图片都是本书的作者们自己的工作成果,尤其是第一作者钟世航对近 30 年来在不同的应用领域中积累并筛选出来的。但有部分图片,如第 3 章 3.1 节中的一些图片是引用了其他同行的资料,大部分已注明出处;有些图片是引自一些探地雷达销售商的技术材料;也有几份资料一时查找不到确切出处,在此向有关同行声明及致歉。

全书共 6 章,钟世航负责全书大纲的拟定与审定工作,并具体负责统稿和定稿。第 1、2 章由孙宏志、钟世航编写;第 3 章由钟世航、刘杰编写;第 4 章由杨峰编写;第 5 章由钟世航、王荣编写;第 6 章由钟世航、王荣编写。本书的编写过程得到了相关单位以及专家、同仁的大力支持,同时也吸收了国内外专家学者在这一研究领域的研究成果,在此一并表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 探地雷达概论	1
1.1 概述	1
1.2 方法原理	3
1.3 解释原理	8
1.4 应用与发展	9
第 2 章 有耗媒质中电磁波的传播特性	11
2.1 单色水平电偶极子源的辐射场	11
2.2 岩矿石的电磁参数	16
2.2.1 高频电磁场中岩矿石的电磁性质	16
2.2.2 岩矿石的相位常数和吸收系数	19
2.3 脉冲偶极子源	21
2.4 传播特点	25
2.5 面电磁波的反射与折射	25
2.5.1 反射定律和折射定律	26
2.5.2 反射系数和折射系数	28
2.6 有限目的体的散射	31
第 3 章 在地质探查和路基探查方面的应用	35
3.1 地质探查方面的应用	35

3.2	在铁路路基检测中的应用	48
3.2.1	应用范围	48
3.2.2	检测的特点	49
3.2.3	国外探测现状	50
3.2.4	检测的意义	52
3.2.5	探测系统	53
3.2.6	检测数据采集	53
3.2.7	病害探测	57
3.2.8	状态评价	62
3.2.9	电磁波速度测定	67
3.2.10	检测中干扰的识别	68
3.3	小结	70
第4章 在公路道路检测中的应用及研究		71
4.1	公路路面厚度质量评价	71
4.1.1	公路路面厚度评价标准	71
4.1.2	厚度提取方法	73
4.1.3	计算机评价方法和步骤	74
4.2	路基雷达检测应用研究	76
4.3	一维滤波	79
4.3.1	数据处理	79
4.3.2	滤波系统	80
4.3.3	FIR 滤波器的应用分析	81
4.3.4	IIR 滤波系统	88
4.4	雷达初至波的确定	88
4.4.1	铁板实验模型	89
4.4.2	空气和水对比模型实验	91
4.5	道路脱空雷达波数字模拟及解释策略	93
4.5.1	TE 极化方式的麦克斯韦方程 FDTD 格式	94

4.5.2	脱空模型模拟结果分析	96
4.6	基于时间窗谱剖面技术的病害解释方法研究	100
4.6.1	电磁波在地层中的传播响应	100
4.6.2	谱剖面技术	102
4.6.3	实际应用	103
4.7	基于滚动谱剖面技术的病害解释方法研究	105
4.7.1	滚动谱剖面的构造	105
4.7.2	滚动谱算法的改进	106
4.7.3	病害介质频率分布特征	107
4.7.4	道路脱空病害滚动谱分析	111
4.7.5	道路病害雷达解释应用实例	113
第5章	在隧道衬砌质量检测方面的检测	116
5.1	检测隧道衬砌的原理及方法	116
5.1.1	检测原理	116
5.1.2	检测工作方法	118
5.2	资料处理及探查效果	121
5.2.1	资料处理	121
5.2.2	雷达探查的典型图像	122
5.2.3	探地雷达的检测效果	132
5.2.4	反射面的偏移归位	135
5.3	无损电测喷射混凝土层厚度的方法	136
5.4	小结	138
第6章	在隧道施工地质预报时探水的资料解释	140
6.1	地下水对雷达波的反射波的特点	141
6.1.1	频率的变化	141
6.1.2	反射波的强度	141
6.1.3	相位的变化	143

6.2 在工程中的实际应用	143
6.2.1 隧道衬砌质量检测时岩体中的地下水	143
6.2.2 隧道施工时预报前方地下水现场资料采集时的 注意事项	145
6.2.3 案例分析	145
6.3 小结	148

参考文献	149
------------	-----

1.1 概述

与探空或通信雷达技术相似,探地雷达也是利用高频电磁脉冲波的反射探测目的体及地质现象,但它是从地面向地下发射电磁波来实现,将雷达原理用于探地,亦称为探地雷达。雷达探测技术用于地下探查早在 1910 年就已提出。当时德国的 G. Leimback 和 Lowy 曾以专利形式阐明这一问题。1960 年 J. C. Cook 用脉冲雷达在矿井中做了试验。但是,由于地下介质比空气具有强得多的电磁波衰减特性,以及地下介质情况的多样性,波在地中的传播特性比在空气中要复杂得多。因此,探地雷达的初期应用仅限于波吸收很弱的冰层、岩盐矿等介质中。如 1963 年 S. Evans 用雷达测量极地冰层的厚度;1970 年 Harrison 在南极冰面上取得了穿透 800~2 200 m 的资料;1974 年 L. T. Procello 用雷达研究月球表面结构;Unbterberger 探测冰川和冰山的厚度等。

20 世纪 70 年代以后,随着仪器信噪比的大大提高和数据处理技术的应用,探地雷达的实际应用范围迅速扩大,包括:石灰岩地区采石场的探测(1971 年 Takazi;1973 年 Kitahra)、工程地质探测(1974 年 R. M. Morey;1976 年、1977 年 A. P. Annan 和 J. L. Davis,1978 年 Olhoeft, Dolphin 等,1979 年 Benson 等)、煤矿井探测(1975 年 J. C. Cook)、泥炭调查(1982 年 C. P. F. Ulriksen)、放射性废弃物处理调查(1982 年 D. L. Wright, R. D. Watts;1985 年 O. Olsson),以及将地面和钻孔雷达用于地质构造填图、水文地质调

查、地基和道路下空洞及裂缝调查、埋设物探测和水坝、隧道、堤岸、古墓遗迹探查等(1982—1987年加拿大、日本、美国、瑞典等报道)。

我国的探地雷达仪器研制始于20世纪70年代,地质矿产部物探研究所、煤炭部煤炭科学院重庆分院、中国科学院、一些高等院校,以及其他研究部门均做过探地雷达仪器研制和野外试验工作。当时使用的是同点天线,以高频示波器显示回波,直接读取初至或照相记录波形,但商用的国产探地雷达直到90年代后期才出现。不过早在80年代初一些国外雷达厂家向我国推广探地雷达时,我国的物探工作者就注意收集他们的探查资料,特别是收集经过验证的资料。80年代中期以来,中国地质大学(武汉)、铁道部门、水电勘测设计部门、国家地震局、煤炭部门、黄河水利委员会、城乡建设部门、环境保护部门等有关部门相继引进了国外的仪器,开始进行实际工作和进一步的试验研究。90年代中期,国产探地雷达的相继问世,应用和理论研究工作正日益扩展。

随着微电子技术的迅速发展,现在的探地雷达设备早已由庞大、笨重的结构改进为现场适用的轻便工具。目前,已推出的商用探地雷达包括:美国地球物理探测设备公司(GSSI)的SIR系列,微波联合公司(M/A—Com, Inc.)的Terrascan MK系列,日本应用地质株式会社(OYO公司)的GEORADAR系列,加拿大探头及软件公司(SSI)的Pulse EKKO系列,瑞典地质公司(SGAB)的RAMAC钻孔雷达系统等。这些商用的探地雷达所使用的中心工作频率在10~1 000 MHz范围,时窗在0~20 000 ns。据报道,根据不同的地质条件,地面系列的探测深度约在20~40 m,分辨率可达1~10 cm(使用频段高的探查深度小、分辨率高,使用频段低的探查深度大、分辨率低)。探地雷达由于采用了宽频短脉冲和高采样率,使其探测的分辨率高于许多其他地球物理探测手段,又由于采用处理程序多次迭加(多达4 000次)和多波形处理等信号恢复技术,因而大大改善了信噪比和图像显示性能。今后的趋势是向多天线高速扫描接收和进一步改善天线对各种目的体的回波响应性能发展,以实现更精确、小尺寸、高工效、低成本,以及图像联系真实地质情况等要求。

在理论研究方面,目前研究重点仍相对地集中在信号处理上。这是因为探地雷达所接收到的信号十分复杂,脉冲在通过地下介质的过程中,波形和波幅将发生较大的变化,而脉冲余振、系统内部干扰、地表不光滑或地下介质

不均匀等引起的散射及剖面旁侧的绕射等干扰,均使得实时记录图像畸变和不易分辨。但是当前的信号处理还只限于时间波形处理,如从单次测量结果中减去平均波形以压低噪声和杂乱回波、采用时变增益以补偿介质吸收和抑制深部噪声、用频率滤波以剔除不必要的干扰频率等。除此之外,还有相关学者研究采用聚焦技术,以集中目的体的空间响应:采用信号增强以及预测反褶积等数值处理技术,以加强近地表被强初至模糊了的反射体波形特征等。为了识别图像或对图像进行地质解释,大多在简单形体正演基础上采用人工判读方法,而专家系统技术也正在进行研究。和地震勘探工作相似,探地雷达探测体的正反演研究也正在进行之中。

当今,由于探地雷达具有下列技术特性,其应用领域正不断开拓,尤其为在工程地质勘察和工程质量检测领域的应用奠定了基础:

(1) 探地雷达是一种非破坏性的探测技术,可以安全地用于城市和正在建设中的工程现场。工作场地条件宽松,适应性强(属于轻便类的仪器)。

(2) 抗电磁干扰能力强,可在城市内各种噪声环境下工作,环境干扰影响小。

(3) 具有工程上较满意的探测深度和分辨率,现场直接提供实时剖面记录图,图像清晰直观。

(4) 便携微机控制数据采集、记录、存储和处理。轻便类仪器现场仅需3人或更少人员即可工作,工作效率高。当然,由于使用了高频率,电磁波能量在地下的衰减剧烈,因而在高导厚覆盖条件下,探测范围受到限制。

探地雷达探查的深度虽然较浅,而我国大量工程建设需要进行较浅深度的质量检测,因此在我国在建隧道和地铁衬砌质量检测、公路路面质量检测、铁路路基质量检测方面有大量应用。目前国内已拥有近3 000台探地雷达。但是,在探地雷达的正演、反演方面,实际应用的定性、定量解释和涉及探地雷达的基本理论方面,还有较大的提高空间。

1.2 方法原理

探地雷达利用高频电磁波(主频为 $10\sim 1\,000\text{ MHz}$)以宽频带短脉冲形式,由地面通过天线T送入地下,经地下地层或目的体反射后返回地面,被另

一天线 R 所接收(见图 1-1)。脉冲波行程需时为

$$t = \sqrt{4z^2 + x^2} / v$$

当地下介质中的波速 v 为已知时,可根据测到的精确的 t 值 (ns , $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$),由上式求出反射体的深度(m)。式中 $x(\text{m})$ 值在剖面探测中是固定的; v 值(m/ns)可以用宽角方式或其他方式测量,当介质的导电率很低时可以根据 $v \approx c/\sqrt{\epsilon}$ 近似算出,其中 c 为光速($c=0.3 \text{ m}/\text{ns}$), ϵ 为地下介质的相对介电常数值,后者可利用现成数据或测定获得。但当介质电导率不可忽视时,波速 v 值与电导率和介电常数都有关,计算公式较复杂(见本章后面的叙述),通常应采用实测得到。

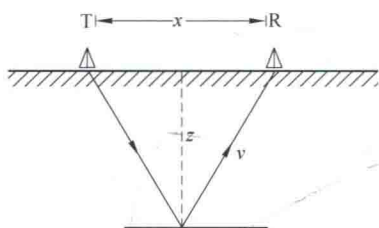


图 1-1 反射探测原理

雷达图形常以脉冲反射波的波形形式记录。波形的正负峰分别以黑、白色表示,或者以灰阶或彩色表示。这样,同相轴或等灰度、等色线即可形象地地表征出地下反射面。图 1-2 为波形记录的示意图。图上对照一个简单的地质模型,画出了波形的记录。在波形记录图上各测点均以测线的铅垂方向记录波形,构成雷达剖面。与反射地震剖面相似,雷达剖面亦同样存在反射波的偏移与绕射波的归位问题。故雷达图形也需做偏移处理。

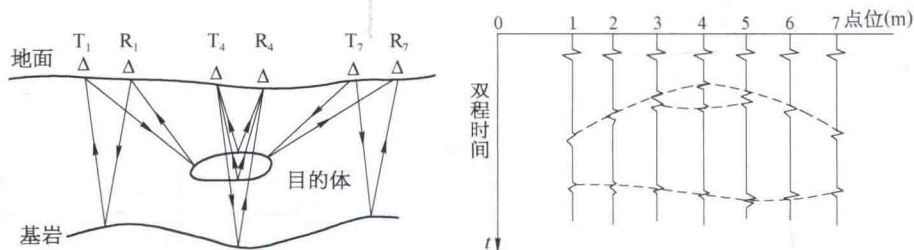


图 1-2 雷达记录示意图

反射脉冲信号的强度,与界面的波反射系数和穿透介质的波吸收程度有关,垂直界面入射的反射系数 R 的模值和幅角,分别可由下列关系式表示:

$$\begin{aligned} |R| &= \sqrt{(a^2 - b^2)^2 + (2ab \sin \varphi)^2} / (a^2 + b^2 + 2ab \cos \varphi) \\ \text{Arg } R &= \varphi = \tan^{-1}(\sigma_2 / \omega \epsilon_2) - \tan^{-1}(\sigma_1 / \omega \epsilon_1) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 $a = \mu_2 / \mu_1$;

$$b = \sqrt{\mu_2 \epsilon_2 \sqrt{1 + (\sigma_2 / \omega \epsilon_2)^2}} / \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 \sqrt{1 + (\sigma_1 / \omega \epsilon_1)^2}};$$

μ 和 ϵ 、 σ ——介质的磁导率、相对介电常数和电导率,角标 1 和 2 分别代表入射介质和透射介质。

由式(1-1)可以看出,反射系数与界面两边介质的电磁性质和频率 ω (即 $2\pi f$) 有关。很明显,电磁参数差别大者,反射系数也大,因而反射波的能量也大。式(1-1)可以用作大致的数值估计。对于斜入射情况,反射系数将因波极化性质而变,反射系数还与入射角大小有关。

介质的含水量一般也会对 σ 、 ϵ 值有影响,含水多者 σ 、 ϵ 值变大,相应地,反射系数也会不同。波的吸收程度与衰减因子有关,表示为

$$\beta = \omega \sqrt{\mu} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right]} \quad (1-2)$$

当介质的电导率很低时,

$$\beta \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 60\pi\sigma \sqrt{\frac{1}{\epsilon}} \quad (1-3)$$

β 是一个与电磁参数有关的量,当介质电导率低时,随 σ 的增大而增大,随 ϵ 的增大而减小;但当介质电导率高时, β 值则与 σ 、 ω 有关,而与 ϵ 几乎无关。表 1-1 列出了常见介质的有关参数。

探测的分辨率问题,是指对多个目的体的区分或小目的体的识别能力。简而言之,这个问题取决于脉冲的宽度,即与脉冲频带的设计有关。频带越宽,时域脉冲越窄,它在射线方向上的时域空间分辨能力就越强,或可近似地认为深度方向的分辨率高,其关系式为

$$1/\Delta t \approx B_{\text{eff}} \quad (1-4)$$

式中 B_{eff} ——有效频带宽度；

Δt ——分辨界面的有效波形之间的时间间隔。

表 1-1 常见介质的有关参数

介 质	电导率(S/m)	介电常数 (相对值)	速度(m/ns)	衰减系数 (dB/m)
空 气	0	1	0.3	0
纯 水	$10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$	81	0.033	0.1
海 水	4	81	0.01	10^3
冰		3.2	0.17	0.01
花岗岩(干)	10^{-8}	5	0.15	0.01~1
花岗岩(湿)	10^{-3}	7	0.1	0.01~1
玄武岩(湿)	10^{-2}	8	0.15(干)	
灰岩(干)	10^{-9}	7	0.11	0.4~1
灰岩(湿)	2.5×10^{-2}	8		0.4~1
砂(干)	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4~6	0.15	0.01
砂(湿)	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	30	0.06	0.03~0.3
黏土(湿)	$10^{-1} \sim 10$	8~12	0.06	1~300
页岩(湿)	10^{-1}	7	0.09	1~100
砂岩(湿)	4×10^{-2}	6		
土 壤	1.4×10^{-4}	2.6~15	0.13~0.17	20~30
	$\sim 5.0 \times 10^{-2}$	~ 40	0.095($\epsilon_r = 10$)	
			0.15($\epsilon_r = 40$)	
肥 土		15	0.078	
素混凝土	$5 \times 10^{-2} \sim$ 2.5×10^{-3}	6.4	0.12	
沥 青		3~5	0.12~0.18	

若从波长的角度来考虑,则工作主频率越高(即波长短),雷达反射波的脉冲波形就越窄,其分辨率应越高。实际应用中可以半波长为尺度来表明纵

向分辨率。例如,对于 100 MHz 的中心频率,在黏土中,波长 $\lambda = 0.6 \text{ m}$ (以 $v = 0.06 \text{ m/ns}$ 计),其分辨能力为 0.3 m。

分辨率问题,还应包含水平空间方向上的区分性概念。这个分辨能力,在很大程度上取决于介质的吸收特性。介质吸收越强,目的体中心部位与、边缘部位的反射能量相对差别也越大,水平方向的分辨能力相对也就较强。吸收系数 β 和探测深度 d 均较大时,可得到关系式:

$$1/\Delta x \approx 1/(3.3\sqrt{d/\beta}) \quad (1-5)$$

式中 Δx ——目的体水平方向的间距。

另外,分辨率还与地下各个方向上脉冲波的能量分布情况,即天线的方向图有关。此外,波的散射截面也对分辨率有影响,而散射截面与面介质和目的体的物理性质、工作频率的大小以及目的体的埋深有关。因此,要了解雷达探测的实际分辨能力,需要根据不同的仪器通过具体试验来进行。需要特别指出的是天线的极化性质,对于线性极化的情形,有时在一些走向方位上接收信号的幅度为零,而圆极化辐射则可避免这一现象。因此,对于线性极化性质的天线,现场工作中必须配合天线试验进行。

现场测量工作,通常采用剖面法(CDP)或宽角法(WARR)两种方式。前者,发射天线和接收天线以固定间距($TR = z = D$)沿测线同步移动,记录点位于 TR 的中点。天线距可由式 $TR = 2D/\sqrt{\epsilon - 1}$ 估计(对于方向仍呈弯月形峰尖临界角的天线),式中 D 为目的体的深度。测量中测点间距应小于波长的 $1/4$ 。对于宽角法,采用一个天线固定,移动另一个天线的方式,或者两天线同时由一中心点向两侧反方向移动。此时记录的是电磁波脉冲通过地下各个不同介质层的双程传播时间,反映地下成层介质的速度分布。其图形是以天线间距为横坐标,双程走时为纵坐标,以同相轴呈倾斜形态显示,速度大者较缓,速度小者较陡。除了剖面法(共深度法)和宽角法以外,还有一种“多天线法(MAM)”。这种测量方式是利用多个接收天线,同时实现多点测量。但这种方法必须考虑天线的屏蔽,以避免直达波或泄漏波在天线之间多次反射造成的干扰。测量方式中尚有“透射法”这一形式,但用得较少。

目前,各种探地雷达仪器的基本原理均类同。雷达控制电路产生一定间隔($3.3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ ns}$,即 $30 \sim 100 \text{ kHz}$ 的重复率)的一系列电磁短脉冲,

由天线送入地下。这些脉冲的频宽按探测分辨特性的要求设计,一般均具有很宽的频带,以使脉冲波形尖锐。脉冲时宽为 $1\sim 10$ ns,脉冲峰值达 $100\sim 150$ V。接收天线(分离式的或同点式的)检测来自地下不同介质界面的反射波(波形稍有变化),送到控制电路,或直接进行数值采集(如EKKO仪),或者经一定的处理以后再做数值采集(如SIR仪)。各类探测仪均由微机控制,并配有数字处理和解释软件,以及黑白(波形或灰阶)或彩色图形输出设备(包括现场模拟显示和打印成图),但各类设备的技术规格、结构、重量等各有特点。

1.3 解释原理

雷达探测资料的解释,包含两部分内容:数据处理和图像解释。由于地下介质相当于一个复杂的滤波器,介质对波的不同程度的吸收及介质的不均匀性质,使脉冲到达接收天线时,波幅被减小,波形变得与原始发射波形有较大的差别。此外,不同程度的各种随机噪声和干扰波,也歪曲了实测数据,因此,必须对接收信号进行适当的处理,以改善数据资料,为进一步资料解释提供清晰可辨的图像。

目前,数字处理主要是对所记录的波形作处理。例如取多次重复测量值的平均值,以抑制随机噪声;取邻近的不同位置的多次测量值的平均值,以压低非目的体杂乱回波,改善背景;做自动时变增益或控制增益以补偿介质吸收和抑制杂波;做滤波处理或时频变换以除去高频杂波或突出目的体、降低背景噪声和余振影响;进一步考虑测域的一维、二维空间滤波;设计与脉冲波形有关的反滤波或匹配滤波器,做与目的体有关的三维处理等。对于小的、局部的和细长物体,其回波散射有一些频谱特性或极化特性需专门考虑,而天线的极化性质也影响着接收效果。这些都是当前数字处理的研究对象。和地震勘探的数字处理一样,探地雷达实测资料的数字处理正处在不断的发展中。

图像解释的第一步是识别异常,然后进行地质解释。对于异常的识别在很大程度上是基于探地雷达图像的正演成果,然而这方面的内容至今报道甚少。中国地质大学(武汉)在完成国家自然科学基金项目“探地雷达目的体物理模拟和数值模拟研究”的过程中,做了一些理论计算和大量的物理模拟实