

公路路基地质雷达

探测技术研究

RESEARCH IN GROUND PENETRATING RADAR
TECHNOLOGIES FOR ROADBED

杨 峰 张全升 王鹏越 等 著



人民交通出版社
China Communications Press

公路路基地质雷达探测技术研究

杨 峰 张全升 王鹏越 等著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书内容为交通部西部交通建设科技项目课题成果的总结和提升,主要针对道路路基探测,详细论述了有关地质雷达基本理论、数据处理方法、资料解释方法和典型应用。本书分9章,主要内容包括电磁波在岩土介质中的传播规律,地质雷达数值模拟算法及道路病害模拟研究,地质雷达数据采集及分析,地质雷达资料处理,地质雷达资料解释和地质雷达实际应用。本书的取材大多来自科研和工程实践,编写时注重理论与实践的结合,内容安排上注重理论的系统性,在理论探讨上尽可能深入浅出,在应用上主要以路基病害探测为主。

本书可作为高等院校工程地质、电子信息、信息与计算科学、应用地球物理等专业研究生教材,也可供道路工程、道路养护、雷达系统、矿业工程、隧道工程、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

公路路基地质雷达探测技术研究 / 杨峰等著. —北京:
人民交通出版社, 2009. 7
ISBN 978-7-114-07911-5

I. 公… II. 杨… III. 公路路基—工程地质—雷达探测
IV. U416.1 U412.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 130931 号

书 名: 公路路基地质雷达探测技术研究

著 作 者: 杨 峰 张全升 王鹏越 等

责任编辑: 郑蕉林

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 13.5

字 数: 248 千

版 次: 2009 年 11 月 第 1 版

印 次: 2009 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07911-5

印 数: 0001~2000 册

定 价: 38.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

本书的内容是交通部西部交通建设科技项目《路基探测技术研究》的成果之一,是所有研究成员多年科研工作的总结。2004年,在交通部西部交通建设科技项目的支持下,由北京星通联华科技发展有限公司作为主承担单位,联合长安大学、国防科技大学、中国地质大学(北京)和中国矿业大学(北京)等具有国内外先进技术水平的高校,并以甘肃长达路业有限公司、甘肃星通联华公路科技发展有限公司、河南中原高速公路股份有限公司、北京首都高速公路发展有限公司、湖北楚天高速公路股份有限公司为依托应用单位,开展基于地质雷达的公路路基探测技术方法研究,通过大量的物理模型试验和实际工程的验证,总结出了一套地质雷达路基探测的方法和具体病害资料分析的思路。

在我国公路建设快速发展的同时,其存在的不合理性也逐渐显现。一直以来,公路部门用于公路新建、扩建的投资比重大,而用于公路养护方面的投资较少;对于公路质量状况的检评重视不够,尤其是在公路路基质量状况检测方面缺少有效的方法和手段。

传统的人工养护方法,路上作业时危险性大,也难以发现道路基础内部的病害隐患;以钻孔取芯为代表的检测方法,是按规范要求随机选点、钻孔取样,进行分析处理,从而获得道路质量状况参数。由于这些常规方法是随机选择测点,因而检测结果随机性大;由于检测深度有限,因而难以发现道路基础内部的病害隐患,通常只有等到路基病害影响到路面时才会被发现;检测效率低、安全性差、影响交通的顺畅,且对公路具有很强的破坏作用。由于缺少有效的检测手段,不能预先发现和查明路基内部病害隐患的分布状况和严重程度,因此难以监控和评估路基质量状况并有针对性地制订处理措施,只能“头痛医头,脚痛医脚”,病害难以根治。这显然已不能适应现代高速公路飞速发展的需要,为此,快速、简便、有效的公路检测技术亟待完善。地质雷达是近些年发展起来的浅层高效地球物理探测新技术,其具有快速便捷,精度高,且探测无损伤等特点,已逐渐被应用到道路建设和检测维护中。目前,地质雷达技术在公路上主要以探测公路面层厚度为主。作者在实际工作中,在和公路现场技术人员进行技术交流中,大家一致认为将地质雷达技术扩展应用到路基及基础病害的探测方面具有重要的意义。基于此,本书编写的目的就

是通过作者的理解和经验总结,不但能在地质雷达探测方面达到指导现场工作的目的,而且能使读者通过本书的学习,开拓对地质雷达资料处理和解释的思路,并进一步开展“发现新问题,解决新问题”的研究。

本书的完成直接或间接地集聚了众多学者的智慧。在本书出版之际,我们要向关心、支持和指导我们开展这项研究工作的交通运输部西部交通建设科技项目管理中心的领导和管理人员表示衷心的感谢!同时感谢云南矿达科技发展有限公司的张维平总工、北京市勘察设计研究院陈昌彦总工、北京勘察技术工程有限公司刘同文总工、北京公联洁达公路养护工程有限公司田立刚工程师、北京奥科瑞检测技术开发有限公司史文建工程师为本书提供的部分数据来源。

课题组研究人员陈尚和、柳浩、王化平、吴赞平为本书提供了大量的试验和工程应用素材,在此一并表示衷心感谢!

由于笔者水平有限,书中的缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2009年5月

目 录

1 导论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外地质雷达技术在公路应用上现状	2
1.3 地质雷达的特点及其技术指标	7
2 地质雷达的理论基础	8
2.1 地质雷达的工作基本原理	8
2.2 电磁波的传播特性	11
2.3 均匀介质中电磁波的传播	14
2.4 电磁波在不同介质交界面上的特性	17
2.5 地下介质电磁特性对电磁波传播的影响	21
3 地质雷达数值模拟技术的研究	27
3.1 概述	27
3.2 时域有限差分的基本思想	28
3.3 微商的差商近似	29
3.4 麦克斯韦方程的 FDTD 格式	30
3.5 数值解的稳定性	36
3.6 吸收边界条件	44
3.7 FDTD 中的激励源	52
4 道路病害地质雷达数值模拟分析研究	53
4.1 概述	53
4.2 道路病害的种类	53
4.3 道路病害数值模拟计算方法	54
4.4 疏松病害模型数值模拟	56
4.5 脱空病害模型数值模拟	61
4.6 空洞病害模型数值模拟	66
5 数据采集参数设置与剖面显示实现	69
5.1 数据采集	69

5.2	雷达显示技术	77
6	数据处理	82
6.1	地质雷达数据处理基础	82
6.2	提高纵向分辨率处理算法及应用	88
6.3	提高横向分辨率处理算法及应用	108
6.4	纵向横向综合处理算法及应用	115
7	病害解释	122
7.1	地质雷达资料解释预处理	122
7.2	支持向量机理论与方法	130
7.3	路基病害识别技术——谱分析	148
7.4	路基病害识别技术——支持向量机	168
8	病害数据库设计	174
8.1	病害类型	174
8.2	路基病害数据库需求分析	174
8.3	数据管理	177
9	地质雷达在公路病害探测中的应用	185
9.1	脱空病害应用	186
9.2	松散病害应用	190
9.3	空洞病害	192
9.4	路基沉陷病害	195
9.5	公路面层厚度评价	196
	参考文献	200

1 导 论

1.1 引 言

交通是国民经济的基础。自 20 世纪 90 年代以来,随着国家对基础建设投资力度的加大,各地的道路交通建设发展迅速,尤其是高等级公路的建设。据统计,截至 2007 年底,中国公路通车总里程已达到 358.37 万 km,高速公路达 5.39 万 km。在“十一五”期间,国家将继续加大公路建设投资,预计到 2010 年,我国高等级公路通车总里程将增加 58 万 km,增长 21%,其中高速公路总里程将增加 2 万 km,增长 44%。公路建设的发展状况直接影响着国民经济的发展,高等级公路的通车里程已成为一个国家经济发达与否的标志。

新、旧道路的交织,极大地方便了人们的交通出行,给社会带来了巨大的社会效益。但是,由于道路老化、气候影响、汽车荷载加大,以及地下管线渗漏等因素的影响,都可能使得道路路基产生空洞、脱空或者疏松的现象。这些存在于道路路基中的病害由于无法被直接看到,所以一般很难得到及时的处理,直到道路发生破坏时才被发现,影响了道路的正常使用。

2006 年 1 月 3 日,北京最重要的路段之一——东三环路京广桥东南角辅路大面积塌陷,塌陷坑深约 10m,面积约 100m²,导致北京东部城区出现轻微交通瘫痪,这是北京市 10 多年来最严重的交通路况事故,数百人因此疏散,数以万计的市民出行受阻。

2004 年 5 月 7 日,北京南三环赵公口桥西侧约 100m 的辅路上,出现了 15m² 左右的塌陷,塌陷深度约为 1m。

2005 年 9 月 12 日,北京市海淀区学院路中国矿业大学门前路面突然发生塌陷,坑中出现积水,除导致该道路一条车道交通受阻外,还威胁到一条地下水管道。

目前,道路塌陷几乎成为全国性问题。在杭州、天津、上海、山西、深圳等许多城市都相继出现过道路路面塌陷的事故。严重的典型事故如,2008 年 7 月 1 日,深圳有一辆满载泥沙的运输车行驶到龙岗坂田五和大道和长发路交叉路口时,路面突然坍塌,路面出现一个面积约 80m² 的大坑,运输车陷进大坑。调查结果显示,该事故是因地下供水管道破裂导致路面塌陷。2008 年 11 月 15 日 15 时许,杭州风情大道地铁施工工地发生大面积地面塌陷事故,一些行进中的汽车坠入塌陷

处,据杭州地铁施工塌陷事故抢险指挥部初步公布的消息,截至15日19时55分,杭州地铁施工塌陷事故已造成1人死亡、16人失踪。

在高速公路上,也发生过多起道路塌陷事故:

2003年7月16日,江西省宜春西村境内的昌金高速公路K469+040处,出现路基塌陷,塌陷后形成东西宽19m、南北长21m、深14m的椭圆形洞穴,面积约为450m²。

2006年3月28日,石太高速寿阳段出现了一个长约100m,深近10m的塌陷空洞。

2006年4月17日,深圳至汕头高速公路深圳境内0km处路面发生塌陷,塌陷造成路面产生一个宽16m、深6m的空洞。

对这些事故原因从技术角度进行分析,可以看出其致害机理的核心就在于各种外部因素导致道路路基出现疏松、脱空、空洞等病害。因此,对道路路基隐藏的病害必须足够重视,加强道路平时的养护,尽可能避免因路基隐藏病害而造成的路面塌陷下沉、道路积水、断裂,甚至交通事故等。

然而,以钻孔取芯为代表的传统检测方法,则是根据规范随机选点进行钻孔取样,通过分析处理,从而获得道路质量状况参数。常规检测有以下缺点:这些常规方法由于随机方式等选择测点,因而检测结果随机性大;因检测深度有限而难以发现道路基础内部病害隐患,通常只有等到路基病害影响到路面时才会被发现;这些方法检测效率低、安全性差、影响交通,而且对公路具有很强的破坏作用。由于缺少有效的检测手段,不能预先发现和查明路基内部病害隐患的分布状况和严重程度,也就难以监控和评估路基质量状况并有针对性地制订处理措施,只能“头痛医头,脚痛医脚”,难以根治病害,这显然已不能适应现代公路飞速发展的需要。因此,如何对已建成的公路进行科学维护,延长道路使用寿命,发展快速、简便、有效的公路检测技术,已成为我国公路建设与管理中急需解决的关键问题。

目前,地质雷达在道路上的应用,还局限于面层及基础结构探测上,对道路病害的探测也仅仅局限于定性解释上,尤其对道路脱空等典型病害的解释存在较大歧异,这已成为道路应用上的瓶颈。由此可见,雷达技术还远远不能满足道路维护部门的实际需要。因此,对道路隐伏病害探地雷达的探测进行理论研究,提供对病害的解释策略,为公路部门的道路养护和评价提供可靠的数据支持,对提高公路检测效果和解释准确性具有重要的意义。

1.2 国内外地质雷达技术在公路应用上现状

地质雷达是近几年迅速发展起来的高分辨、高效率的无损探测技术,是目前工程检测和勘察最为活跃的技术方法之一,其在道路工程中的应用日趋广泛。

1.2.1 地质雷达组成

地质雷达是向地下发送脉冲形式的高频宽带电磁波,电磁波在地下介质传播过程中,当遇到存在电性差异的地下目标体,如空洞、分界面时,电磁波便发生反射,返回到地面时由接收天线所接收。在对接收到的雷达波信号处理和分析的基础上,根据信号波形、强度、双程走时等参数便可推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态,从而达到对地下隐蔽目标物的探测。

地质雷达系统分为雷达主机和天线系统两大部分,如图 1-1 所示。雷达主机包括计算机系统和控制单元;天线系统包括发射和接收两部分,其中发射包括发射控制器与发射天线,接收包括接收控制器与接收天线。各部分的主要功能如下所述。

(1)计算机系统。采集参数的设置,数据显示和保存。

(2)控制单元。为发射控制器和接收控制器提供严格时间延迟的触发脉冲信号,同时把接收控制器传递来的模拟信号数字化。

(3)发射控制器。产生发射脉冲信号。

(4)接收控制器。采样并保持接收天线传递来的模拟信号。

(5)发射天线。将发射脉冲电信号转换为电磁波信号。

(6)接收天线。将电磁波信号转换为电信号。

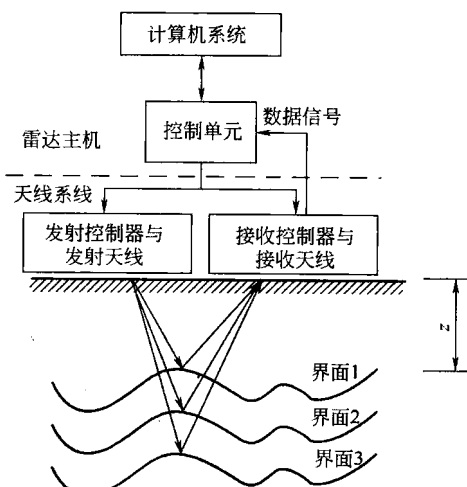


图 1-1 地面地质雷达探测示意图

1.2.2 地质雷达技术的发展历史

从 20 世纪 70 年代以来,地质雷达技术得到了长足发展,大体可分为三个阶段:

(1)从 20 世纪 70 年代初期~20 世纪 70 年代中期为第一阶段,称为试验阶段,在这个阶段中,主要研究地质雷达的工作原理、方法和研制试验系统。

(2)20 世纪 70 年代中后期~20 世纪 80 年代为第二阶段,也称为实用化阶段,同时也是技术不断发展的阶段。

(3)从 20 世纪 80 年代至今为第三阶段,称为完善和提高阶段,在此期间,对天线结构、信号处理、地下目标成像等方面提出了一些新的见解。

雷达在一个行业的应用与该行业的建设发展密切相关。近年来,地质雷达技术已经在公路建设行业得到广泛应用,尤其在隧道质量检测领域。目前,对公路隧道检测主要以引进的地质雷达技术为主。引进的主要设备有:美国地球物理仪器公司(Geophysical Survey Systems,简称GSSI)的SIR系列;加拿大Sensors&Software公司的EKKO系列;瑞典玛拉公司(MALA Geoscience)的RAMAC系列;意大利IDS公司的RIS系列。

随着国内外技术的交流及地质雷达技术的发展,从20世纪90年代中期开始,国内的一些研究机构,如中国矿业大学(北京)、中国地质大学、长春地质学院、河南地球物理工程勘察院、中国电波传播研究所、中科院电子所等,开始将地质雷达技术应用于公路工程质量检测,并取得了较为良好的检测效果。

近几年来,地质雷达在硬件方面的发展已趋于平稳,仪器生产厂家把重点放在了数据采集速率和信噪比的提高上,以及数据处理和解释软件的智能化方面。

地质雷达主机可以分为以下两种形式:一体化结构和分体式结构。一体化结构把计算机系统和控制单元安装在同一个主机箱中;分体式结构把计算机系统和控制单元分为两个独立箱体。一体化结构的仪器有SIR系列等,图1-2是不同类型一体化主机。分体式结构的仪器有RAMAC系列等,图1-3是不同类型分体式结构的控制单元。

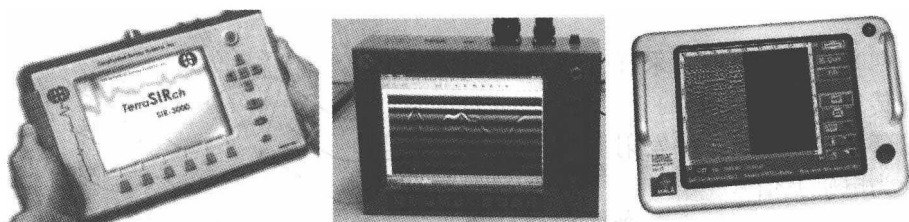


图 1-2 不同类型的一体化主机

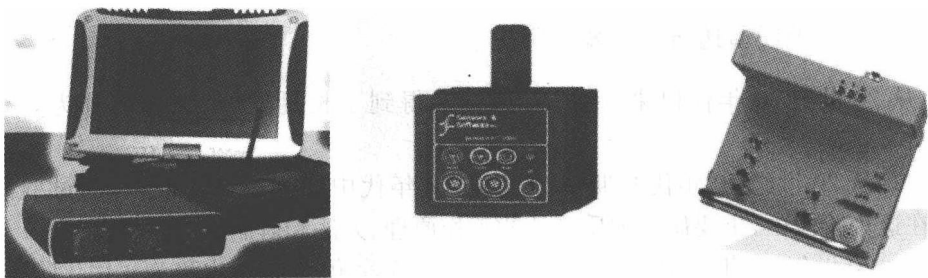


图 1-3 不同类型的分体式结构控制单元

地质雷达天线结构也可以分为一体化结构和分体式结构两种。一体化结构把发射系统和接收系统安装在同一个箱体;而分体式结构则把发射系统和接收系

统分为独立的单元。一体化结构主要应用于屏蔽天线,而分体式结构主要应用于非屏蔽天线。屏蔽天线主要应用于 100MHz 以上天线,非屏蔽天线主要应用于 500MHz 以下天线。不同公司开发的产品一般都有屏蔽和非屏蔽两种。图 1-4 是不同类型的屏蔽天线;图 1-5 是不同类型的非屏蔽天线。

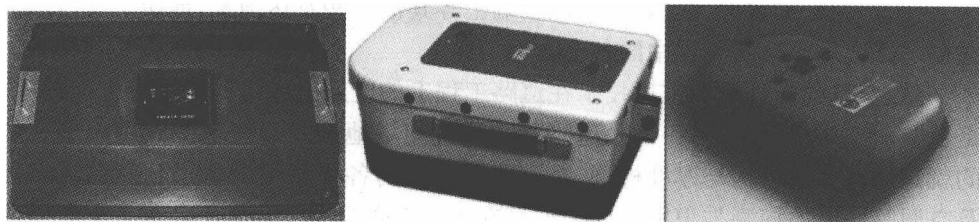


图 1-4 不同类型的屏蔽天线



图 1-5 不同类型的非屏蔽天线

1.2.3 地质雷达在道路检测方面的应用

20 世纪 80 年代初期,欧洲斯堪的纳维亚半岛上的丹麦、瑞典等国,就开始将地质雷达应用于道路检测工作,但那时这种方法尚未开始广泛应用。直到 1986 年芬兰拉普兰地区的道路管理部门购买了此设备后,地质雷达才被作为常规的检测工具,广泛应用于芬兰各类道路设计和修复工程中,开始其主要应用于高速公路的检测和质量评定方面;从 20 世纪 90 年代中期开始,才逐渐应用于桥梁面板检测;从 1998 年开始,这种方法逐渐被应用于城市道路的设计和质量控制工作。

美国把地质雷达技术应用于道路检测方面起步较早,在 20 世纪 70 年代就开始了相关的试验研究工作,不过此时主要是对其在公路隧道及桥梁面板方面的应用进行研究。1985 年,在美国联邦公路局的支持下,针对高速公路使用的车载雷达系统开始得到发展。从那时开始,采用高频、空中发射天线技术的地质雷达,被广泛应用于公路面层厚度检测、混凝土板下脱空检测以及桥梁面板损伤区域检测等方面。

20 世纪 90 年代末期,Morey 对地质雷达在北美包括美国 50 个州交通部门的使用情况开展调查,结果表明,约有 33 个地区(占调查总数 65%)在利用地质雷达

技术进行无损检测,其中最常见的应用是道路面层厚度检测(24 个地区)、空洞探测(22 个地区)和桥梁检测(16 个地区)。此外,在道路脱空检测、道路基础厚度检测以及路基中不明物体探测等方面也都进行了一些成功的应用。经统计,其使用目的主要集中在路面结构层厚度检测上,其次为脱空识别和桥梁检测等方面。

在意大利、加拿大、法国、英国以及瑞士等其他一些发达国家,地质雷达技术也在被广泛应用于道路工程中的各个方面。

总之,目前国外地质雷达技术在道路工程上的应用大致可分为两个方面:一个是道路面层质量评估,另一个是道路路基调查与场地探测。在这些应用中最有效的就是道路面层结构与厚度检测,对道路面层下的各种隐伏病害,如脱空、疏松以及空洞等病害的探测与识别解释上还存在着一定的问题,还没有达到完全实用的阶段,有待进一步的研究。

1.2.4 地质雷达目标识别方法研究现状

地质雷达目标识别是根据地下目标回波信号的特征对其进行判别的技术。目标识别和解释是地质雷达检测的最终目的。当前,地质雷达目标识别的方法主要有如下 3 种。

(1) 利用目标传递函数来识别目标

目标传递函数识别法又叫极点提取法。其基本思想是,将雷达目标看成是一个滤波器,入射信号为输入,反射信号为输出。

20 世纪 70 年代末,美国的 Luen C. Chan 等人利用极点提取法对若干地下浅层掩埋体进行试验研究,取得了较为可靠的试验数据。但由于不同目标有不同的传递函数,而对传递函数则由相应目标的极点和留数来决定,因此,该算法依赖于目标的所有极点和留数,而且算法复杂。

(2) 利用谐波综合法来识别目标

谐波综合法是用频率分量为谐波关系的多频信号(如锯齿波)来照射目标,然后分析回波中各个频率分量的振幅和相位,经过综合得到目标的响应,以此来识别目标。

目标的响应是轴向目标截面积变化的函数。如果从其他方向照射目标,则可得相应方向的目标截面积变化的情况。所以,这种目标识别技术是根据几何特征(主要是外形)对目标加以判别。但这种方法过分依赖于几何特征,忽略了信号中原有的其他特征信息,容易受到与目标形状相近物体的干扰,会造成错误识别。

(3) 智能化和统计学识别方法

随着智能计算技术、统计学和数字信号处理技术的发展,产生了许多新的数据处理方法,如神经网络、模糊集理论、分形理论、遗传算法、支持向量机等。这些方

法都是将现代智能计算技术和统计学理论的某一方面的突出特点应用于地质雷达数据处理的某个具体领域。例如利用支持向量机去噪和目标识别,利用分形算法处理地质雷达资料等。智能计算技术克服了传统识别算法复杂和模型难以构建的缺陷,采用智能化建模理论和方法,算法相对简单并容易实现,因此,基于智能计算技术和统计学的识别方法是地质雷达目标识别的主流技术方法,也是未来研究的热点。

1.3 地质雷达的特点及其技术指标

1.3.1 地质雷达特点

地质雷达作为一种新兴的地球物理方法,与其他地球物理方法(如浅层地震勘探、电阻率法、激发极化法)相比,具有以下的特点:

(1)分辨率高。地质雷达中心频率为 $10\sim 1\,800\text{MHz}$,其最高分辨率可达毫米级。

(2)无损性探测。由于地质雷达利用自身系统发射高频电磁波来探测地下目标,因而探测具有非破坏性,是一种无损探测技术。

(3)探测效率高。地质雷达仪器轻便,可连续测量,从数据采集到处理成像一体化,操作简单,采样速度快。

(4)结果直观。地质雷达采用图像实时显示,可在野外进行定性解释。

(5)易受干扰。由于地下媒质比空气具有较强的电磁波衰减特性,加之地下媒质的多样性和非均匀性,电磁波在地下的传播比在空气中复杂,因而,地质雷达极易受到外界干扰源的影响。

1.3.2 地质雷达技术指标

技术指标是衡量设备效果的重要依据。地质雷达主要技术指标有以下内容:

(1)脉冲重复频率,决定设备的采样速度。

(2)模数转换器(A/D 转换器),是采样信号动态范围的主要因素。

(3)仪器信噪比,决定可识别最小信号的能力。

(4)时间窗宽度,决定设备可探测深度范围。

(5)采样点数,决定采集信号的分辨率(与采样时间窗相关)。

(6)最小步进延迟,决定采样信号的纵向最高分辨率。

(7)采样触发方式,决定数据采集过程的可操作性和灵活性。

2 地质雷达的理论基础

2.1 地质雷达的工作基本原理

2.1.1 地质雷达的探测方式

地质雷达是向地下发送脉冲形式的高频宽带电磁波。电磁波在地下介质中传播过程中,当遇到存在电性差异的地下目标体,如空洞、分界面时,电磁波便发生反射,返回到地面时由接收天线所接收。在对接收天线接收到的雷达波进行处理和分析的基础上,根据接收到的雷达波形、强度、双程走时等参数便可推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态,从而达到对地下隐蔽目标物的探测。地质雷达采用非接地性测量,可作快速连续无损检测,能比较直观地表现检测目标物,因此,地质雷达技术成为工程地球物理勘察的重要方法之一。地质雷达探测示意图如图 2-1 所示。

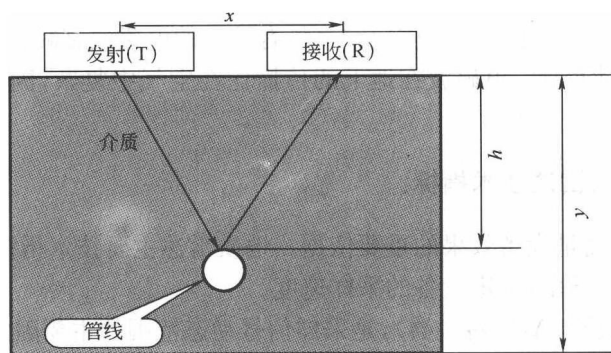


图 2-1 地质雷达探测示意图

地质雷达工作时,由发射天线(T)向地下介质发射一定中心频率的高频电磁脉冲波,经地下地层或目的体反射后返回地面,被接收天线(R)所接收(见图 2-1)。脉冲波行走时间为

$$t = \sqrt{4h^2 + x^2} / v \quad (2-1)$$

式中： v ——电磁波在媒质中的传播速度。

地质雷达探测目的层深度的计算式为

$$h = \frac{\sqrt{(vt)^2 - x^2}}{2} \quad (2-2)$$

如果发射(T)和接收(R)天线之间的距离满足 $x \ll z$, 那么式(2-1)和式(2-2)就可以简化为

$$t = 2h/v \quad (2-3)$$

$$z = \frac{vt}{2} \quad (2-4)$$

当地下介质的波速 v (m/ns) 已知时, 可根据精确测得的走时 t (ns), 由上式求出反射物的深度 h (m)。波的双程走时由接收脉冲相对于发射脉冲的延时进行测定。反射波形由重复间断电路, 按等效采样方式等间距地采集叠加波而获得。当地面发射和接收天线沿探测线以等间距移动时, 即可在纵坐标为双程走时 t (ns), 横坐标为距离 x (m) 的雷达屏幕上, 描绘出由反射体的深度所决定的“时距”波形道的轨迹图(图2-2)。与此同时, 地质雷达即以数字的形式记下每一道波形的数据。

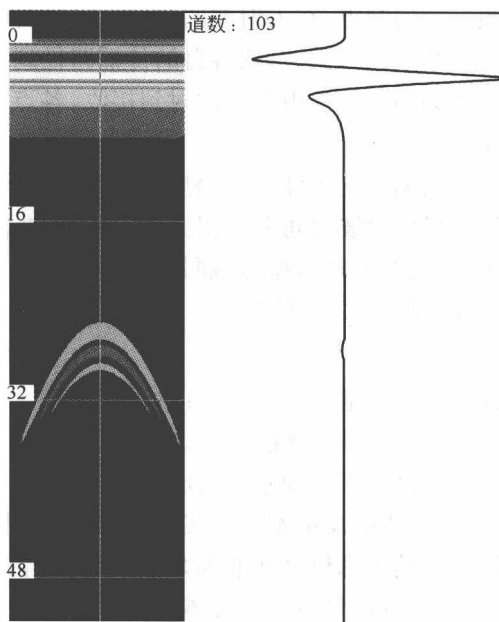


图 2-2 雷达剖面记录示意图

2.1.2 地质雷达的分辨率和探测深度

地质雷达的主要技术参数分辨率和探测深度直接影响着探地雷达的性能和应用效果。以下将对这两个主要技术参数进行讨论。

1. 分辨率

地质雷达的分辨率是指其能够分辨的最小异常介质的能力。地质雷达的分辨率可以分为垂直分辨率和横向分辨率两种。

(1) 垂直分辨率

垂直分辨率是指在地质雷达剖面中能够区分一个以上反射界面的能力。研究表明, 当地层厚度等于地层波长的 $1/2$ 时, 来自该层顶底界面的反射会产生相消性干涉; 而随着地层变薄, 来自该层顶底界面的反射则会产生相长性干涉, 这种干涉在层厚为 $1/4$ 波长时达到最大。当地层进一步变薄时, 这种干涉逐步变强, 直至

射完全消失。也就是说,当地层厚度为 $1/8$ 波长时,就接收不到来自顶底界面的反射信号,只能接收到它们的复合波形信号,这时探地雷达就失去了分辨能力。在实际工作中,一般把 $1/4$ 波长厚度作为垂直分辨率下限。

(2) 横向分辨率

地质雷达在水平方向上所能分辨的最小异常体的尺寸,称为水平分辨率。按照光学的观点,在入射波的激发下,异常体表面各个面元都可看作新波源,这些新波源产生的二次波,依各自的传播路径到达观测点,于是测点接收到的总场为所有二次场的叠加。由于从发射到接收,各点的行程不同,因此,各次波场因相位不同而产生相互干涉。

根据波的干涉原理,法线反射波与第一菲涅尔带外缘的反射波的光程差为 $\lambda/2$ 。当反射波之间发生相长性干涉时,振幅增强;而当第二菲涅尔带内的反射波发生相消性干涉时,振幅减弱。当界面埋深为 H ,收发距离小于 H 时,第一菲涅尔带直径可按式(2-5)计算

$$d_f = \sqrt{H\lambda/2} \quad (2-5)$$

式中: λ ——雷达子波波长;

H ——异常体的深度。

正是由于菲涅尔带的出现,使异常体的边界模糊不清。从采集的各种数据可看出,每段的反射都大于实际大小。这是因为尽管激发和接收已越过异常体边界,但由于其边部仍处在菲涅尔带内,因此,接收天线仍接收到来自异常体的反射信号。由此可得出:①异常体水平尺寸为 d_f 的 $1/4$ 时,仍能接收到清晰的反射波,也就是说,探地雷达的水平分辨率,高于菲涅尔带直径的 $1/4$;②由于菲涅尔带的存在,当两个有限异常体间距小于 d_f 时,则不易把这两个目的体区分开。

2. 探测深度

地质雷达能探测到目标体的最大深度,称为地质雷达的探测深度,亦称探测距离。当雷达系统选定后,系统的增益 $Q = W_t/W_p$ (W_t 为仪器的发射功率; W_p 为接收系统的背景噪声功率)为已知,因此,只要到达接收器的回波信号幅度大于 W_p 时,来自该目标体的回波就可以被雷达系统识别。于是,探测深度的预测,可归结为求目标体回波的大小。

图 2-3 表示从发射到接收的功率传递过程。若发射天线辐射的功率为 W_t ,发射天线效率为 η_t ,考虑到辐射功率呈球面扩散和媒质的吸收 e^{-2br} (b 为吸收系数, r 为传播距离),以及在入射方向上天线的方向增益 G_t ,则入射波到达目标体表面时的功率密度 P_s 为

$$P_s = W_t \eta_t G_t \frac{1}{4\pi r^2} e^{-2br} \quad (2-6)$$