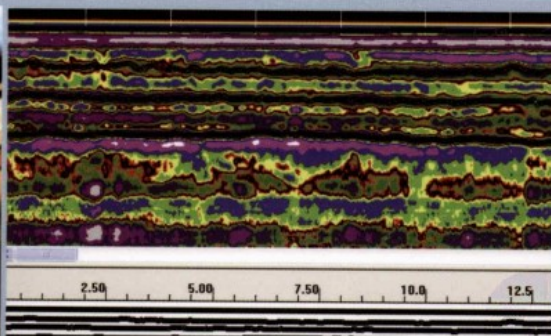
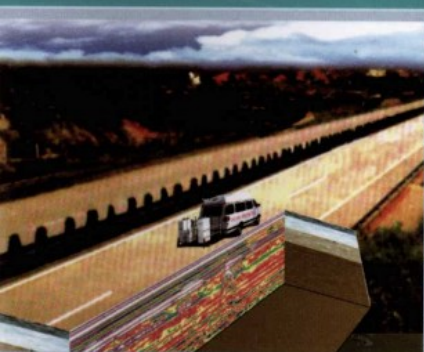


公路路面无损检测中的 探地雷达技术研究

耿玉岭 贾学民 李大鸣 刘国辉 著
张立柱 乔建中 赵东力 董茂干



地震出版社

责任编辑：张友联

封面设计：OOICA 原创任玮

ISBN 978-7-5028-3207-0



9 787502 832070 >

定价：45.00元

公路路面无损检测中的 探地雷达技术研究

耿玉岭 贾学民 李大鸣 刘国辉 著
张立柱 乔建中 赵东力 董茂干

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

公路路面无损检测中的探地雷达技术研究/耿玉岭等
著. —北京:地震出版社, 2007. 9

ISBN 978-7-5028-3207-0

I. 公… II. ①耿… III. 雷达探测—电磁法勘探应用—
公路—路面—无损检验 IV. U416.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 140506 号

地震版 XT200700209

公路路面无损检测中的探地雷达技术研究

耿玉岭 贾学民 李大鸣 刘国辉 著
张立柱 乔建中 赵东力 董茂千

责任编辑: 张友联

责任校对: 庞娅萍

出版发行: **地震出版社**

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京市顺义富各庄福利印刷厂

版 (印) 次: 2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 218 千字

印张: 8.5

印数: 0001~1000

书号: ISBN 978-7-5028-3207-0/TU·249 (3897)

定价: 45.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

探地雷达作为一门公路路面检测技术，它具有实时检测、简便高效、准确无损、连续检测、信息丰富和图像解释直观等优点。自从 20 世纪 80 年代引入公路检测领域以来，深受人们的重视，其检测效果越来越被人们认可。由于公路路面结构、材料的特殊性和对路面检测精度要求较高的特点，尚有一些技术问题需要深入的研究。这些问题主要有：技术标准不统一；各类路面材料的介电参数研究不深入；对路面内不同结构界面的雷达反射信号特征识别还存在着不同的认识；还未建立起路面缺陷异常图像的统一判别标准；缺乏开发实用的自动定量解释软件；信号处理技术水平有待进一步提高；对施工中的基层质量检测技术不成熟；对于雷达分辨率还缺乏深入研究等。近十年来国内外同行先后开展相关技术问题的研究，取得了一批科研成果，从而大大推动了探地雷达在公路路面检测中的应用和发展。

自 20 世纪 90 年代以来，我们得到了河南省地矿厅和河南省交通厅科技基金立项资助，分别完成了“高等级公路质量无损检测方法技术试验研究”（李保群、耿玉岭，1999）和“公路路面基层缺陷及厚度无损检测技术研究”（贾渝新、耿玉岭，2005）等项目，通过课题组多年来的科技攻关，取得了一大批相关成果。系统地论证了雷达技术在检测公路路面中的可行性及分辨率；通过埋板试验明确了路面各结构层界面处探地雷达反射波特征；研究了适应路面基层检测的技术标准；提出了路面介电特性参数或波速测定的最佳技术方法；研究了提取路面病害引起的雷达局部异常的数据处理技术；提出了对路面缺陷雷达异常判别的标准和半定量解释方法。鉴于目前探地雷达技术在公路路面检测中将大力推广应用的趋势，但至今还未见较系统、全面地介绍应用探地雷达技术进行公路路面检测的专著。为此，在总结了我们多年来有关科研成果，并吸收了国内外最新研究成果的基础上，编撰成本书。

本书的主要内容包括：探地雷达技术的检测原理，雷达检测方法技术的试

验, 雷达资料处理与解释方法, 路面结构层测厚技术, 路面基层检测技术, 雷达信号的数据模拟理论, 以及利用探地雷达开展路面基层检测的推荐技术标准等。全书力图作到理论推导系统性, 技术方法介绍实用性, 概念阐述通俗性。该专著的出版问世, 将有利于探地雷达技术在公路路面检测中的推广使用, 必将有力地推动我国公路路面检测事业的发展。本书可作为相关专业的大学本科生或研究生的参考教材, 又可作为从事公路检测的技术人员和从事相关技术的研究人员深入掌握探地雷达技术的参考书。

在本书编写过程中, 耿玉岭、刘国辉同志负责了全书的统稿和编纂工作, 河南省地球物理工程勘察院和石家庄经济学院有关领导和同仁对本书的出版给予了大力的支持; 地震出版社的张友联同志作了细致的审校编辑, 为本书付出了辛勤的劳动, 在此一并表示深切的谢意! 书中还有需要进一步探讨或错误之处, 期待读者对本书不吝赐教指正。

作 者

2007.07.01

目 录

绪论	(1)
公路检测的现状	(1)
目前公路检测中存在的主要问题	(2)
公路路面探地雷达无损检测技术的发展趋势	(3)
第 1 章 探地雷达技术的检测原理	(5)
1.1 探地雷达技术的发展与现状	(5)
1.2 理论基础	(5)
1.2.1 电磁波传播规律	(5)
1.2.2 平面谐波电磁波	(9)
1.3 探地雷达的基本原理	(14)
1.3.1 工作原理	(14)
1.3.2 脉冲电磁波的发射、接收原理	(15)
1.4 探地雷达检测的分辨率	(18)
1.4.1 垂向分辨率	(18)
1.4.2 水平分辨率	(21)
1.5 探地雷达的最大探测深度	(23)
第 2 章 探地雷达检测方法技术试验研究	(25)
2.1 试验研究的目的	(25)
2.2 路面基层结构及其常见缺陷(病害)类型	(25)
2.2.1 路面基层结构	(25)
2.2.2 路面基层常见病害类型	(27)
2.3 现场试验方法	(29)
2.3.1 试验路段	(29)
2.3.2 仪器设备	(29)
2.3.3 检测试验设计	(30)
2.4 路面探地雷达检测的现场技术标准研究	(34)
2.4.1 测线、测网布置原则	(34)

2.4.2	中心频率的选择	(35)
2.4.3	测量时窗选择	(37)
2.4.4	时间采样间隔的选择	(37)
第3章	探地雷达资料数字处理技术与解释方法研究	(39)
3.1	探地雷达资料数字处理技术研究	(39)
3.1.1	数字滤波	(39)
3.1.2	反褶积	(40)
3.1.3	波动方程偏移	(41)
3.1.4	小波变换技术	(42)
3.1.5	局部异常提取处理技术	(46)
3.2	探地雷达检测资料解释方法	(48)
3.2.1	探地雷达的基本波形特征	(48)
3.2.2	探地雷达波相的识别方法	(49)
第4章	探地雷达检测路面结构层厚度研究	(52)
4.1	正常路面结构层的探地雷达检测图像	(52)
4.2	探地雷达检测路面结构层厚度的原理和方法	(54)
4.3	电磁波传播速度的获取方法	(57)
4.4	探地雷达检测路面结构层厚度的误差分析	(59)
4.5	路面基层厚度检测效果分析研究	(61)
4.5.1	基层不同铺筑阶段的厚度检测效果	(61)
4.5.2	不同天线频率的检测效果	(64)
4.5.3	横向电磁波速度不均匀对厚度检测效果的影响	(69)
4.5.4	接触式天线的垂向颠簸对基层厚度检测精度的影响分析	(71)
4.5.5	探地雷达检测路面基层厚度的准确性试验分析	(71)
4.6	公路面层厚度探地雷达检测效果分析研究	(73)
4.6.1	公路面层厚度探地雷达检测图像	(73)
4.6.2	钻孔标定法获取速度的检测结果	(75)
4.6.3	反射系数递推法获取速度的检测结果	(76)
第5章	已运营公路基层常见缺陷(隐患)检测	(80)
5.1	基层富水致使强度变低导致路面塌陷的隐患缺陷检测	(80)
5.2	基层裂缝检测	(81)
5.3	路面下脱空检测	(81)

5.4	基层含水量检测	(83)
第6章	施工过程中路面基层缺陷检测	(85)
6.1	施工过程中路面基层的探地雷达信号特征分析	(85)
6.1.1	施工过程中基层的探地雷达信号的基本特征	(85)
6.1.2	结构完整的基层探地雷达信号特征	(85)
6.1.3	结构缺陷的基层探地雷达信号特征	(88)
6.2	施工过程中探地雷达检测的路面基层缺陷判别方法	(94)
6.2.1	绝对幅值缺陷判别法	(94)
6.2.2	相对幅值缺陷判别法	(100)
6.3	路面基层松散缺陷的判别与检测	(107)
第7章	雷达信号的数值模拟理论研究	(110)
7.1	射线追踪法	(110)
7.1.1	方法原理	(110)
7.1.2	收敛性问题	(113)
7.1.3	雷达波的衰减问题	(113)
7.1.4	数值模拟计算	(114)
7.2	有限元法	(115)
7.2.1	雷达波和地震波之间运动学规律的对比	(115)
7.2.2	雷达波有限元正演模拟的实施	(116)
7.2.3	数值模拟计算	(118)
第8章	探地雷达检测路面基层技术的推荐标准	(121)
8.1	基本要求	(121)
8.1.1	适用范围	(121)
8.1.2	检测方法	(121)
8.1.3	应用条件	(121)
8.1.4	检测工作程序	(121)
8.2	仪器设备及技术要求	(123)
8.2.1	仪器类型	(123)
8.2.2	技术要求	(123)
8.2.3	天线	(123)
8.2.4	检测辅助设备	(123)
8.3	外业工作	(123)

8.3.1	一般要求	(123)
8.3.2	现场踏勘	(123)
8.3.3	试验对比	(123)
8.3.4	检测线(网)布置原则	(124)
8.3.5	仪器技术参数的设置	(124)
8.3.6	探地雷达记录	(125)
8.4	内业工作	(125)
8.4.1	一般要求	(125)
8.4.2	原始资料的整理与编辑	(125)
8.4.3	数据处理	(125)
8.4.4	探地雷达检测图像的分析与判别	(126)
8.4.5	探地雷达检测图像的解释	(126)
参考文献		(128)

绪 论

公路检测的现状

随着国民经济的快速增长,我国公路事业得到了长足的发展,高速公路网已经初具规模,各种等级的公路网度不断加密。同时,公路的施工质量和运行质量问题越来越引起人们的重视。其中关键的技术问题是公路施工质量和缺陷的检测方法。长期以来,常规的公路检测方法大致可分为两大类:一类是表观检测,它是依靠检测者直接观察或借助于测绘工具(直尺、水准仪、经纬仪等)和公路部门已有的专用仪器(颠簸累积仪、平整度仪、路面横向系数测定仪等)进行无损检测,用于公路路面、路基施工过程中的质量评价和公路运行状况的评价。这种检测方法虽直观易行,但不能对公路内部隐蔽结构做出评价,仅限于几何尺度检测与评价,也不能进行工程力学指标的检测与评价。另一类是工程试验检测,它是对已投入使用的公路或公路施工过程中的路基、垫层、基层和面层采用一定的方式进行样点抽查,检测其厚度、压实度、含水量、抗压强度、抗折强度、弯沉值、稳定性等指标,寻找是否存在不良隐患。这类检测方法又可分为现场原位试验和室内样本试验两种,该类检测技术通过获取抽查样点的公路工程力学参数,对公路施工质量和使用状态做出较全面的评价。尽管上述检测技术已成为公路检测评价的标准方法,被列入我国的公路检测规范,但有的属于有损检测,有的存在着效率低、小样本和成本高等问题,达不到国际上先进的无损、准确、快速、全面的公路检测要求。为快速、准确、科学地评价公路质量,需要研究公路检测的新技术和新方法。

20 世纪 80 年代以来,人们开始了运营公路或公路施工过程中基层和面层质量无损检测新技术的研究,美国测试与材料学会 (ASTM), 国际标准组织 (ISO), 英国标准研究院 (BSI) 联合提出了公路无损检测的标准为:

- (1) 必须能准确地确定公路各结构层的缺陷类型、形状、大小和深度;
- (2) 必须无损;
- (3) 必须能在大范围内进行连续检测和定位;
- (4) 做到省力、高效、实时检测,装备轻便;
- (5) 必须不受周围环境的影响;
- (6) 必须方便使用者。

由于探地雷达方法具有快速、连续、无损检测的特点,在该标准提出之后,国际上开始了以探地雷达为主要技术的公路检测方法的研究开发工作。1994 年美国研制出世界上第一台公路型探地雷达 SIR-10H,我国早在 1983 年铁道部引进了第一台探地雷达 SIR-8,进行路基检测试验研究。

20 世纪 90 年代初我国开展了探地雷达检测公路路面结构的研究(李大心,1996),此外,在引进日本瑞雷波勘探技术的基础上,开展了瑞雷波勘探技术进行公路质量无损检测方

法的实验研究(扬成林, 1996), 并取得了长足的进展, 研究出相应的专用仪器设备和解释软件; 针对钢性路面开展的超声波检测技术的研究, 也在检测混凝土路面质量起到了一定的作用。

上述检测技术方法的研究, 有力推动了我国的公路检测技术的发展, 但由于在技术上仍处于研究试验推广阶段, 需要进行深入的研究工作, 建立新技术的检测标准, 促其技术方法趋于完善和标准化。

目前公路检测中存在的主要问题

当前公路工程的快速发展, 对公路检测技术不断提出新的挑战, 要求公路检测技术做到无损、准确、快速、全面。这已成为当代检测技术的发展方向。而现有的公路检测技术越来越显得不适应公路工程发展的需要, 其存在的主要问题是:

(1) 各类检测方法采集或观测的样本量太小, 不能反映公路整体质量和运行状态, 漏检缺陷(病害)的概率极大。从而使检测合格的公路存在着很大的病害风险, 影响着公路的使用寿命。

(2) 现行的检测技术对路体产生一定程度的破损(如取芯法、挖坑法、环刀法、灌砂法), 特别是随着检测样本的增大, 极有可能成为某些路段病害的起源。

(3) 设备笨重, 检测效率低、成本高。由于大部分属于工程试验或揭露性取样方法, 采用机械方法进行原位试验和检测(或者进行样品的室内测定), 这样会导致检测周期长, 或成本费用高, 远不适应高效、优化的公路建设与运营的要求, 特别是对公路运营阶段的隐患和施工过程中的缺陷不能做到及时发现。

(4) 检测仪器设备技术方法单一, 综合检测功能差。有的方法对场地条件具有一定的特殊要求, 往往出现对公路工程的一次检测评价, 需要布置多种检测手段才能完成的局面。

(5) 一些检测方法探测深度受到限制(如核子法探测深度不超过 20 cm)。

针对上述问题, 人们开展了运用探地雷达技术、瑞雷波技术和超声波技术对公路路面基层检测方法的研究。从方法的实用性, 有效性和准确性对比, 探地雷达技术优势明显, 在公路检测应用研究中越来越引起人们的重视, 其检测有效性和可靠性正在被人们所接受, 相应的技术方法得到了推广应用。但鉴于公路构造的特殊性和公路检测需要的规范性, 目前, 探地雷达公路检测技术存在以下问题尚待解决:

① 技术标准不统一。由于探地雷达技术用于公路检测还处于初期, 至今还没有形成统一的、规范性的技术标准。例如: 直接影响检测路面结构层厚度精度的工作频率的选择问题, 影响整体评价的观测方法问题, 均没有从技术上、理论上深入研究, 从而出现技术方法的多样化, 导致公路检测结果的非标准化。为此, 应研究统一的技术标准使其规范化。

② 对路面各种材料的电性参数研究不深入。由探地雷达的原理可知, 对探测体内不同介质的电性参数, 特别是其介电常数(或波速)掌握的准确程度, 直接影响着探测结果的精度。由于电性参数属于多因素制约量, 因地制宜。因此, 只有结合公路结构和实际用材的特性, 深入研究适合其结构层介质电性参数测试的最佳方法, 确定不同结构层材料电性参数的常见值和分布范围, 才能保证探测精度。

③ 对公路病害隐患探地雷达异常图像缺乏评判的统一标准。由于公路病害隐患与探地

雷达异常图像的对应关系缺乏系统的研究,从而导致同一个异常图像不同人可能得出不同的解释结果。需要深入开展不同公路结构类型、不同公路材料、不同公路缺陷类型的探地雷达异常图像的模型研究,以指导检测资料的解读,提高检测结果的可靠性和检测评判标准的统一性。

④ 缺乏探地雷达资料的定量解释方法的研究。目前对探地雷达的异常图像多限于定性解释,特别是对不同公路缺陷类型的异常图像缺乏定量化的解释和数值模拟,从而导致异常解释可能出现较大误差,也难以定量的给出公路三维工程性态与质量的评价,而建立公路的三维数值模拟模型,实现定量解释和检测成果的三维可视化是一个重要的发展方向。

⑤ 探地雷达信号处理水平低。探地雷达工作频率高,易受外界干扰,特别是在地下介质分布复杂的条件下,会出现多次反射波,绕射波和相干波等干扰信号,有用信号往往被淹没在干扰信号中(或信噪比较低),直接影响对异常图像解读,亟需研究出适合探地雷达特点,有效提取公路结构层缺陷异常的数据处理新技术和新方法。

⑥ 对施工过程中的基层缺陷及厚度检测技术尚未成熟。路面基层的施工质量是直接影响了整个公路施工质量的关键因素。但由于施工过程的基层检测需要实时进行,而基层集料处于养护初期条件下,开展探地雷达检测工作是世界范围的研究重点,至今仍未解决的难题。系统开展施工过程中的路面基层探地雷达检测技术研究具有十分重要的理论意义和实用价值。

公路路面探地雷达无损检测技术的发展趋势

目前,我国公路路面厚度和隐蔽病害的检测技术主要采用的是取芯法,同时结合人工表面调查的方式对路面质量现状进行评价,这种常规检测方法存在着需要对路面实施一定程度的破损,属小样本检测,加之工作效率低,直接制约着公路路面检测行业的发展。随着路面探地雷达检测技术在国内外的广泛使用,必将给公路路面检测技术带来革命性的发展。虽然该方法的检测效果已被人们所公认,其优势越来越显得突出,但还有一些关键技术问题有待进一步研究,技术方法本身的潜力还有待于开发和应用领域进一步扩大,随着公路事业的快速发展,用于公路路面检测的雷达技术发展趋势如下。

(1) 开展路面各层材料介电特性的深入分析研究是目前雷达技术应用的关键技术点,它是确保路面探地雷达检测成果的物质基础,所以对路面材料介电性的进一步研究是探地雷达无损检测技术发展的一个重要趋势。

(2) 扩展探地雷达在路面检测技术的应用领域,除了完善目前雷达用于路面测厚和探测隐蔽病害技术外,开展路面基层压实度、含水量、沥青含量等检测技术是今后一个时期雷达技术主要研究方向之一。

(3) 路面探地雷达的实用处理软件(包括数据处理与自动图像识别和解释)的开发显得非常关键。设备提供了检测的手段,而软件决定了应用的广度和深度。可以认为,未来路面雷达技术推广应用的速度主要取决于实用软件的开发速度及深度,所以,探地雷达资料处理和解释软件的进一步研究又是探地雷达路面无损检测技术发展的一个趋势。

(4) 开展探地雷达的数值模拟技术的研究,建立各种路面缺陷的雷达图像的理论模型,为深入开展雷达异常图像特征研究提供有利的技术支持,为雷达异常图像的定量解释打下坚

实的基础。

(5) 建立以地理信息系统为平台的路面雷达检测数据管理系统, 实现信息化管理; 此外, 随着探地雷达技术在路面检测中的广泛推广使用, 在总结多年来检测工作的基础上, 应抓紧组织制定全国性探地雷达在路面检测中的行业技术标准。

参考文献

1. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
2. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
3. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
4. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
5. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
6. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
7. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
8. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
9. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
10. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
11. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
12. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
13. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
14. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
15. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
16. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
17. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
18. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
19. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.
20. 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准. 北京: 人民交通出版社, 1998.

第 1 章 探地雷达技术的检测原理

1.1 探地雷达技术的发展与现状

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, 简称 GPR) 测试技术是利用高频电磁脉冲波在不同电磁性介质中的传播规律, 达到探测地下目标体分布形态及特征的一种方法。早在 1910 年, 德国人 Leimbach 和 Lowy 就在一份德国专利中阐明了探地雷达的基本概念。1926 年, Htllsenbeck 首次利用电磁脉冲技术研究地下岩性构造并获得成功。此后近 40 年, 探地雷达技术有了很大改进, 但由于地下介质比空气对电磁波具有强得多的衰减特性, 而且电磁波在地下介质中的传播比在空气中要复杂得多, 所以它仅限于研究介质相对均匀、对电磁波吸收很弱的地质环境, 如极地冰层、淡水湖泊、沙漠及盐岩等介质。Evans 于 1963 年用探地雷达测量了极地冰层的厚度, Procello 于 1974 年用探地雷达研究月球表面结构, Unbterberger 探测了冰川和冰山的厚度等。这其中, Annan 等许多学者作了大量的理论及试验研究工作, 为这一技术的发展奠定了基础。20 世纪 70 年代以后, 随着电子技术的迅速发展及现代处理技术的应用, 许多商业化的探地雷达系统先后问世, 其中具代表性的有美国地球物理探测设备公司 (GSSI) 的 SIR 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 钻孔地质雷达系统及日本应用地质株式会社 (OYO) 的 GEORADAR 系列等。与此同时, 探地雷达的应用范围也在不断扩大, 已经覆盖了考古、矿产资源勘查、岩土工程测试、工程质量无损检测、环境工程等诸多领域。与其他地球物理方法相比, 探地雷达具有下列优势:

- (1) 高分辨率, 工作频率高达 5 GHz, 分辨率可达厘米级。
- (2) 无损性, 或非接触。
- (3) 高效率, 设备轻便, 操作简单, 从数据采集到图像处理实现一体化, 可进行实时测量, 并输出现场剖面记录图。
- (4) 抗干扰能力较强, 可在各种噪声环境下工作。

探地雷达 (GPR) 采用的是时间域脉冲雷达, 将宽频带的脉冲发射到地下介质中, 通过接收反射信号达到探测地下目标的目的。但由于地下介质的复杂性、非均质性、无规律性以及多变性, 时至今日仍有些难题有待解决。近年来, 随着电子技术的飞速发展和地震勘探施工及解释技术的日趋成熟, 使得探地雷达技术取得了突破性的进展, 应用领域越来越广泛。

1.2 理论基础

1.2.1 电磁波传播规律

1.2.1.1 电磁场方程

探地雷达利用高频电磁波进行测量。根据电磁波理论, 高频电磁波在介质中的传播服从

麦克斯韦方程组

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (\text{法拉第定律}) \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & (\text{安培定律}) \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & (\text{涡旋场}) \\ \nabla \cdot \vec{D} &= \rho & (\text{库仑定律})\end{aligned}\quad (1-2-1)$$

式中, $\vec{E}$ 为电场强度 (V/m); $\vec{B}$ 为磁感应强度, 或磁通密度 (1T=1Wb/m²); $\vec{H}$ 为磁场强度 (A/m); $\vec{D}$ 为电位移矢量 (C/m²); $\vec{j}$ 为电流密度 (A/m²); ρ 为自由电荷密度 (C/m³)。

麦克斯韦方程的物理意义是, 它建立了场强矢量、电流密度及电荷密度之间的关系, 描述了电磁场的运动学规律和动力学规律。此方程组描述介质中产生电磁场的特点, 且在场源以外区域成立。如果考虑一次场源作用, 为求解上述方程的电磁场的各场量, 还必须引进介质的本构关系——物质方程。

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1-2-2)$$

式中, σ 为介质的导电率 (S/m); μ 为介质的导磁率 (H/m); ϵ 为介质的介电常数 (F/m)。

1.2.1.2 电磁场的波动性

麦克斯韦方程组描述了随时间变化的一组耦合的电场和磁场。当输入一个电场时, 变化的电场产生变化的磁场。电磁场相互激励的结果是电磁场在介质中传播。探地雷达利用天线产生电磁场能量在介质中传播, 由麦克斯韦方程及本构关系, 可写成如下的形式

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mu \vec{H})$$

将安培定律

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

代入, 整理可以得到

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-2-3)$$

同理有

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-2-4)$$

上述二式为电磁场的 Helmholtz 方程, 表征了电磁波的传播方式。由此, 可得出以下结论:

- (1) 电磁场以波动形式运动的, 它们共同构成了脱离场源的、向外扩散的电磁波。
- (2) 对于探地雷达, 场源为发射天线中的电流密度变化, 产生向外辐射的电磁波。
- (3) 方程中的第一项表征电磁波随空间的变化, 第二项为传导电流对电磁波的贡献, 第三项属位移电流对电磁波的贡献。

(4) 将式 (1-2-3) 和式 (1-2-4) 的波动方程与数理方程串的标准波动方程 ($\nabla^2 \mu - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} = 0$) 比较, 可知电磁波的传播速度:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1-2-5)$$

在真空中为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 0.3 \text{ m/ns} \quad (1-2-6)$$

式中, $\mu_0 = 4\pi/10^{-7} \text{ H/m}$, 为真空导磁率; $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$, 为真空介电常数。

1.2.1.3 电磁波的横波性

由 Helmholtz 方程解出的电场表达式形式如下:

$$\vec{E} = f(\vec{r}, \vec{k}, t) \vec{u}$$

式中, $\vec{r}$ 为位置矢量; $\vec{k}$ 为电场空间变化方向; $\vec{u}$ 为电场方向。

对上式两端求旋度, 即

$$\nabla \times \vec{E} = \vec{k} \times \vec{u} \frac{\partial f}{\partial \beta}(\beta, t) \quad (1-2-7)$$

式中, $\beta = \vec{r} \cdot \vec{k}$ 。

据法拉第定律, 有

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} = -\vec{k} \times \vec{u} \frac{\partial f}{\partial \beta} \quad (1-2-8)$$

可见, 磁场方向垂直于电场方向和电场的空间变化方向, 从而表明电磁波为横波。

1.2.1.4 电磁位函数

为求解麦克斯韦方程组方便, 在电磁理论中引入电磁位函数, 假设

$$\begin{aligned} \vec{H} &= \nabla \times \vec{A}, \\ \vec{E} &= -\nabla \phi - \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1-2-9)$$

式中, $\vec{A}$ 为电磁矢量位; ϕ 为电磁标位。

将其代入麦克斯韦方程组, 整理后, 可得

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \nabla(\nabla \cdot \vec{A} + \mu\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial t}) &= -\mu \vec{j} \\ \nabla^2 \phi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \nabla(\nabla \cdot \vec{A} + \mu\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial t}) &= -\frac{\rho}{\epsilon} \end{aligned} \quad (1-2-10)$$

进一步引入洛伦兹(规范)条件

$$\nabla \cdot \vec{A} + \mu\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (1-2-11)$$

上述二式可简化为电磁位函数的基本波动方程

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} &= -\mu \vec{j} \\ \nabla^2 \phi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= -\frac{\rho}{\epsilon} \end{aligned} \quad (1-2-12)$$

对于探地雷达采用的鞭状电偶极子天线辐射问题, 鉴于源电流密度是无旋的, 为求解该类问题方便, 将天线内的短电流源等效为极化电流密度的形式, 即

$$\vec{j} = -\nabla \cdot \vec{P}$$