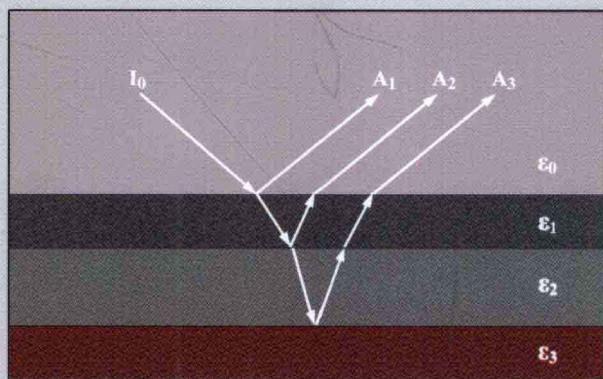
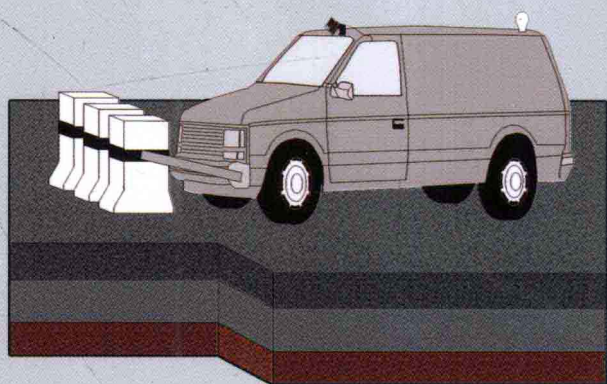


层状体系介电特性 反演理论及其应用

王复明 张 蓓 蔡迎春 钟燕辉 著



科学出版社

层状体系介电特性 反演理论及其应用

王复明 张 蓓 蔡迎春 钟燕辉 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

层状体系介电特性是探地雷达无损检测技术在道路及堤防工程中应用的基础。本书系统总结了作者十余年来在介电特性反演理论与应用方面的研究成果。主要包括:探地雷达的发展及其工作原理,层状介质探地雷达电磁波正演模拟,层状体系介电特性反演及厚度分析方法,复合介电特性模型及其在道路工程中的应用等。

本书较全面地介绍了层状体系介电特性反演方面的最新进展,并指出了值得重视的前沿课题,可作为岩土工程、道路与铁道工程、水工结构工程等专业的研究生教材,并可供工程检测相关领域的科研人员或工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

层状体系介电特性反演理论及其应用 / 王复明等著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030707-1

I. ①层… II. ①王… III. ①层状体系-介电性质-研究②路面-工程结构-理论研究 IV. ①TN959.1②U416.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 056795 号

责任编辑: 沈 建 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 耕 者

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 3 月第一次印刷 印张: 15

印数: 1—3 000 字数: 289 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来,探地雷达(GPR)技术的发展十分迅速。在设备研发方面,多种频率的地面耦合及空气耦合探地雷达系统相继问世,信号采集和数据处理技术水平不断提高。在工程应用方面,探地雷达技术已经广泛应用于土木、水利、矿山、地质、农业、林业、环境及国防等工程领域,显示出十分广阔的发展前景。

对于道路等层状结构,由于线路较长,采取钻孔取芯等破坏性检测方法效率低、代表性差,对交通有一定干扰。探地雷达具有快速、连续、无损等优势,因而在国内外受到广泛重视。目前,探地雷达技术已成为道路检测中的重要手段。

然而,道路工程对探地雷达检测技术有其特殊要求,特别是对于路面厚度检测的精度要求较高(通常要求厚度检测误差小于5%)。由于道路材料特性复杂,沿线地区地质条件变化等原因,探地雷达很难达到工程要求精度,不得不结合钻孔取芯进行精度标定。理论上,探地雷达可以检测压实度、含水量等指标,但实际上很难实现,使探地雷达应用范围受到很大限制。造成上述问题的主要原因在于探地雷达基础研究相对滞后,特别是关于路用材料介电特性的研究成果匮乏,严重制约着探地雷达技术的发展和應用。

作者针对道路及堤防工程探地雷达检测技术存在的困难,围绕层状体系介电特性反演问题已持续开展十多年的研究。在层状介质探地雷达电磁波正演模拟、层状体系介电特性反演及厚度分析方法、复合介电特性模型及其在道路工程中的应用等方面取得了一些成果,本书作以系统总结。

本书的内容安排是这样的:

第1章,绪论。介绍探地雷达技术的发展、介质介电特性及其确定方法以及层状体系介电特性反演理论的发展。

第2章,探地雷达工作原理及技术特性。概述探地雷达系统组成、工作原理及技术特性。

第3章,层状均匀介质探地雷达电磁波正演模拟。介绍了探地雷达电磁波传播理论,建立了层状均匀介质探地雷达电磁波正演模拟的多频成分合成方法,分析了介电常数对探地雷达反射信号的影响。

第4章,层状非均匀介质探地雷达电磁波正演模拟。建立了非均匀层状体系探地雷达电磁波正演模拟的时域有限差分方法,并对介电常数沿竖向不均匀分布和沿水平方向不均匀分布情况下的探地雷达电磁波进行正演模拟。

第5章,层状体系介电特性反演分析的系统识别方法。阐述了系统识别反演

理论,建立了以系统识别原理和灵敏度分析为基础的层状体系介电特性反演方法,并进行了理论验证。

第6章,层状体系介电特性反演分析的遗传算法。介绍了遗传算法的基本原理,提出了层状体系介电特性反演分析的遗传算法以及遗传算法和系统识别的联合反演方法,并对三种反演方法进行了对比分析。

第7章,路面结构层厚度分析。概述了现行路面结构层厚度分析方法,提出了基于反演理论的路面结构层厚度分析方法,开发了路面结构介电特性反演及厚度分析软件 SIDTHK,并通过实际工程对软件进行了考评。

第8章,路用材料复合介电特性模型及其应用。开展了路用材料复合介电特性模型试验研究,提出了基于反演理论的路基路面材料压实度、孔隙率、含水量或沥青含量分析方法,研究了基于反演理论的路基含水量、水泥稳定基层强度、沥青混合料级配快速检测分析技术。

应该指出,层状体系介电特性反演是随着探地雷达技术发展起来的前沿学术方向,涉及电磁学、数学、材料等学科专业和道路、机场、堤防等工程领域。本书虽然较为系统地总结了作者的研究成果,但不少方面有待进一步深入研究。因此,本书既是对前期研究成果的总结,也是对本领域新课题的展望。希望读者对书中内容错误之处给予指正,并给作者今后的研究工作给予指导。同时,作者也希望能有更多的学者和工程技术人员投入到本领域的研究工作中,以共同推动介电特性反演理论和探地雷达技术的发展。

本书是王复明团队十余年持续研究的成果总结。张蓓、钟燕辉、蔡迎春先后完成介电特性反演理论方向的博士论文,构成了本书的主要内容。郭成超、李嘉、李强、陈忠平、徐平、李晓龙、张君静等老师以及陶向华、孟美丽、黎春林、张勇、刘俊、王海涛、冯晋利、方宏远、刘强、李婧琳、杨兵等研究生参与了部分研究工作,为本书的完成做出了贡献。

作者的研究工作得到国家杰出青年科学基金、教育部新世纪优秀人才支持计划、交通部西部交通建设科技项目、河南省杰出人才创新基金、河南省杰出青年科学基金等科技计划项目的资助,得到林皋院士、Lytton R L 教授、钟万勰院士、郑颖人院士、周丰峻院士、彭向和教授、周晶教授、康海贵教授、刘迎曦教授、陈国靖研究员、张晓冰教授级高工、唐伯明教授、沙爱民教授、郭大进教授级高工、梁新政教授级高工、范跃武教授级高工、马健教授级高工、王辉教授级高工、温胜强教授级高工、刘文廷博士、Saarenketo T 博士、Scullion T 研究员、Fernando E G 博士、Uhlidtz P 教授、Sorensen A 博士等专家的指导和帮助,作者在此表示衷心的感谢。

作 者

2011年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 探地雷达技术的发展	1
1.2 介质介电特性及其确定方法	4
1.2.1 介质的介电特性	4
1.2.2 介电常数的确定方法	7
1.3 层状体系介电特性反演理论的发展	8
1.4 本书的内容安排	10
参考文献	11
第 2 章 探地雷达工作原理及技术特性	15
2.1 探地雷达系统组成及工作原理	15
2.2 探地雷达技术特性	19
2.2.1 探地雷达探测性能分析	19
2.2.2 探地雷达测量参数的选择	23
2.2.3 探地雷达性能指标分析	25
参考文献	27
第 3 章 层状均匀介质探地雷达电磁波正演模拟	28
3.1 探地雷达电磁波传播理论	28
3.1.1 层状均匀介质探地雷达电磁波波动方程	28
3.1.2 探地雷达电磁波在两种不同介质交界面上的传播特性	32
3.1.3 探地雷达电磁波的波谱特征	33
3.2 层状均匀介质探地雷达电磁波正演模拟	34
3.2.1 正演模拟多频成分合成方法	34
3.2.2 正演模型的建立	36
3.2.3 实例分析	41
3.3 介电常数对探地雷达反射信号的影响	47
3.3.1 探地雷达电磁波在有耗介质中的传播特性	47
3.3.2 单层体系中介电常数对探地雷达反射信号的影响分析	48
3.3.3 多层体系中介电常数对探地雷达反射信号的影响分析	50
参考文献	56

第4章 层状非均匀介质探地雷达电磁波正演模拟	58
4.1 非均匀材料介电特性试验	58
4.1.1 材料介电常数非均匀性试验验证	58
4.1.2 非均匀介电常数对探地雷达信号解释精度的影响	61
4.2 层状介质探地雷达电磁波正演模拟的时域有限差分方法	62
4.2.1 时域有限差分法	62
4.2.2 层状介质探地雷达电磁波正演模拟	70
4.3 非均质层状体系探地雷达电磁波正演模拟	91
4.3.1 竖向非均质层状体系探地雷达电磁波正演模拟	91
4.3.2 水平非均质层状体系探地雷达电磁波正演模拟	94
4.3.3 工程实例对比分析	97
参考文献	100
第5章 层状体系介电特性反演分析的系统识别方法	102
5.1 系统识别反演方法的理论基础	102
5.1.1 系统识别基本原理	102
5.1.2 反演方程的建立	103
5.1.3 反演方程的求解	105
5.1.4 算例分析	108
5.2 层状体系介电特性反演分析的系统识别方法	115
5.2.1 层状体系介电特性反演	115
5.2.2 介电特性反演方程的建立和求解	117
5.3 系统识别反演方法的考评	120
参考文献	123
第6章 层状体系介电特性反演分析的遗传算法	124
6.1 遗传算法基本原理与实现过程	124
6.1.1 遗传算法发展概况	124
6.1.2 遗传算法基本原理及其特点	124
6.1.3 遗传算法的实现过程	126
6.2 层状体系介电特性反演分析的遗传算法	131
6.2.1 层状体系介电特性反演遗传算法的实现	131
6.2.2 算例分析	132
6.3 遗传算法和系统识别联合反演方法	133
6.3.1 联合反演方法的实现	133
6.3.2 算例分析	135
参考文献	136

第 7 章 路面结构层厚度分析	137
7.1 基于简化公式的路面结构层厚度分析方法	137
7.1.1 路面结构层厚度检测技术概况	137
7.1.2 探地雷达厚度检测简化计算公式	138
7.2 基于反演理论的路面结构层厚度分析方法	142
7.3 路面结构介电特性反演及厚度分析软件 SIDTHK	146
7.3.1 SIDTHK 软件设计	146
7.3.2 SIDTHK 软件考评	147
7.4 工程应用实例	153
参考文献	163
第 8 章 路用材料复合介电特性模型及其应用	166
8.1 路用材料复合介电特性模型试验研究	166
8.1.1 复合介电特性模型	166
8.1.2 路用材料复合介电特性试验研究	171
8.1.3 路用材料复合介电特性模型改进	181
8.2 基于反演理论的路基路面材料压实度、孔隙率、含水量或沥青含量 分析	196
8.2.1 路基路面材料压实度、孔隙率、含水量或沥青含量的定义	198
8.2.2 基于反演理论的路基路面材料压实度、孔隙率、含水量或沥青含量分析	200
8.2.3 工程应用实例	202
8.3 路基含水量分析	204
8.4 水泥稳定基层强度分析	209
8.5 沥青混合料级配分析	214
参考文献	228

第 1 章 绪 论

1.1 探地雷达技术的发展

雷达(Radar)源于 Radio Detection and Ranging 的缩写,原意是“无线电探测与测距”,即应用无线电方法发现目标并测定它们在空间的位置^[1]。因此,雷达检测技术实质上是一种特高频电磁波的发射、接收和分析的技术,它利用目标对电磁波的反射现象来发现目标并测定其位置。

雷达技术的发展可追溯到 19 世纪初。当时,雷达技术被用来发现空中目标并测定其位置和速度。此后,雷达技术基本原理逐步被揭示,如不同的物体对电磁波具有不同的干扰特性,介质的介电常数、电导率和磁导率等特性决定着电磁波传播的规律以及电磁波在真空中的传播速度等于光速等,对雷达技术的发展起到了推动作用。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是雷达技术逐渐由军用转向民用方向发展的一个重要成果。

探地雷达是利用高频无线电波来确定地下介质分布特性的无损检测技术。其工作原理类似于探空雷达,即由发射天线向地下发射高频脉冲电磁波,电磁波在地下介质传播过程中,遇到存在电性差异的物体界面会产生发射,反射回来的电磁波经由接收天线接收,根据接收的雷达回波波形、振幅和双程走时等参数来推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态,从而达到探测地下目标的目的^[1~3]。探地雷达发射与接收的射频频率一般在 $10^7 \sim 2 \times 10^9$ Hz 之间。雷达波频率高,波长短,遵守波的传播规律,具有入射、反射、折射与衰变等传播特点^[4]。与探空雷达不同的是,由于地下介质特性比较复杂,且介质对电磁波具有较强的衰减作用,使得电磁波在地下的传播特性要比在空气中的传播特性复杂得多。

探地雷达技术的发展始于 20 世纪初。1904 年,德国 Hulsemeyer 首次尝试用电磁波信号来探测远距离地面金属体,这便是探地雷达的雏形。1910 年,德国 Letmbach 等在一项专利中正式阐明了探地雷达的基本概念。其后,Letmbach 等又用两分离天线在地表进行发射与接收来探测地下水 and 矿层,并通过地下发射波与地表泄漏的直接波之间的干涉进行地下目标的深度判别。1926 年,德国 Hülsenberg 提出应用电磁脉冲技术探测地下结构的思路,并发现电磁波在介电常数不同的介质交界面上会产生反射。这一发现构成了探地雷达技术的理论基础。

探地雷达发展初期的几十年间,主要被应用于对电磁波吸收很弱的冰层、岩盐等介质的探测。比如,1929年 Stern 在奥地利应用探地雷达探测了冰河的厚度;20世纪50年代初,ElSaid 用探地雷达实现了沙漠地下水调查;1951年,Steenson 用雷达探测冰川的厚度;美国军队在60年代中期委托 Calspan 公司率先采用雷达进行了非金属地雷的探测及相关研究;60年代末,美国研究人员认为月球表层物质的电磁特性与冰相似,因而决定采用雷达作为探测工具,并针对性地设计了几种方案,最终由阿波罗17号携带探地雷达在月球表面完成了实地勘测;1963年 Evans S 用雷达测量极地冰层的厚度;1970年 Harison 在南极冰层上,用探地雷达取得了800~1200m 穿透深度的资料;1974年,Unterberger 利用探地雷达探测盐矿夹层,Campbell 利用探地雷达探测冰川和冰山的厚度等。

20世纪70年代后,随着电子技术的发展以及现代先进数据处理技术的应用,探地雷达的应用范围从冰层、盐矿等弱耗介质扩展到土层、煤层、岩层等有耗介质,探地雷达的研发和应用得到国际上的广泛重视。60年代末期,丹麦与英国研制了由飞机搭载的探地雷达用于冰河调查;1979年,美国 SRI International 用机载探地雷达进行了为期七年的热带森林调查;Morey 在1974年设计出超宽带探地雷达,为探地雷达开创了新的发展方向;1980~1990年期间,日本 OYO 公司开发了 Geo2 Radar 的探地雷达;加拿大 A2Cubed 公司于1988年创建了探头及软件公司(SSI),致力于 Pulse EKKO 系列探地雷达的研发和推广;80年代全数字化探地雷达的问世,具有划时代的意义。数字化探地雷达不仅提供了大量数据存储的解决方案,同时增强了实时和现场数据处理的能力^[5];20世纪末期,计算机的发展全面推动了探地雷达的技术进步,在大型计算机上已可进行三维数值模拟,借助探地雷达进行地下测绘并且三维可视化也变得可行。

进入21世纪,探地雷达在土木、水利、矿山、地质、农业、林业、环境及国防等工程领域得到更加广泛的应用。许多国家加大了探地雷达技术的科研投入,新型探地雷达不断涌现。意大利设计出在太空运行的探地雷达。Duke 大学依照时间反转的概念设计了一种新型雷达,在信号发射和数据处理方面与传统探地雷达相比,具有工作效率高、数据处理快的优势,有望提高探地雷达处理复杂问题的能力^[6~8]。

我国的探地雷达研究始于20世纪70年代初期。西安交通大学、电子部二十二所、成都电子科技大学、北京邮电大学等单位较早地开展了探地雷达硬件的研制工作。进入80年代后,一些高校和研究单位相继引进国外的探地雷达设备。主要有:①美国地球物理探测设备公司(GSSI)的 SIR 系列;②加拿大探头及软件公司(SSI)的 Pulse EKKO 系列;③美国脉冲雷达公司的 Rodar 系列;④美国 Penetradar 公司的 GPR 系列;⑤日本应用地质株式会社(OYO)的 GEORADAR 系列;⑥瑞典地质公司(SGAB)的 RAMAC/GPR 雷达系统;⑦意大利 IDS 公司的 RIS

系列雷达;⑧俄罗斯 GEOTECH 公司的 OKO-2 系列雷达等。这些雷达所使用的中心工作频率为 $10\sim 2500\text{MHz}$, 时窗 $0\sim 20000\text{ns}$, 探测深度可达数十米, 分辨率可达厘米级。虽然我国的探地雷达研究起步较晚, 但近些年来在该领域也取得了较为突出的成果。80 年代初, 中国电波传播研究所、西安交通大学、中科院长春地理所、北京理工大学、西南交通大学、北京公路研究所和东南大学等单位开展了探地雷达相关基础理论的研究。中国电波传播研究所于 1990 年研制出 LT21 和 LT21A 型探地雷达, 2004 年研制成功 LTD22000 小型探地雷达; 北京爱迪尔国际探测技术有限公司 1997 年研制了 CBS29000V 型车载脉冲探地雷达; 长江工程地球物理勘测研究院、国防科技大学等单位在 863 计划资助下, 在探地雷达仪器研制和信息处理技术方面取得重大进展, 有力提升了我国探地雷达技术水平。

探地雷达应用于道路与堤防工程无损检测的研究起始于 20 世纪 70 年代中期。80 年代后期, 随着举世瞩目的美国战略性公路研究计划 (SHRP) 的实施, 以落锤式弯沉仪 (falling weight deflectometer, FWD)、探地雷达为代表的公路无损检测技术的研究与应用受到国际上的普遍重视。1985 年, FHWA 车载式探地雷达检测系统应用于路面结构层厚度检测、混凝土板下脱空识别和桥梁病害检测等。德州交通研究所 Lytton、Scullion、Maser 等人在探地雷达理论与应用技术研究取得了重要成果^[9~24]。在欧洲, 丹麦和瑞典最早使用探地雷达进行路面检测, 而芬兰 Roadscanner 公司 Saarenketo 的研究成果在国际上有较大影响^[19~31]。1988 年, 芬兰国家公路管理局 (FINNRA) 将探地雷达作为常规检测工具应用于道路检测, 为道路设计和维护提供依据。芬兰早期主要是利用 $100\sim 500\text{MHz}$ 频率范围的低频地面耦合雷达, 开展路面结构病害探测及路面性能评价方面的研究。90 年代初期和中期, 芬兰开始将频率为 $1.0\sim 1.5\text{GHz}$ 的高频空气耦合雷达应用于桥梁检测、路面设计和质量控制等。

我国关于探地雷达在道路与堤防检测中的应用研究开始于 20 世纪 80 年代。国家地震局、黄河水利委员会黄河科学技术研究院、铁道部铁道科学研究院、交通部公路科学研究院、中国科技大学、大连理工大学、华南理工大学、长沙理工大学、郑州大学等单位结合道路、堤防工程实际, 在探地雷达应用技术研究取得了较为丰富的成果^[32~48]。北京爱迪尔国际探测技术有限公司研制出 CBS-9000 型道路雷达检测系统。随着我国高速公路、堤防工程养护维修任务日益繁重, 探地雷达检测技术的研究和应用得到广泛关注。

总体上看, 经过几十年的发展, 探地雷达设备不断完善, 信号采集及数据处理技术日趋成熟, 应用范围逐步扩大。但是, 目前在道路与堤防检测中, 探地雷达技术仍存在一些困难和问题。主要有: ①路面厚度检测精度有待提高。工程实际中对路面厚度检测精度要求较高。探地雷达检测精度受多种因素影响, 时常需要钻孔取芯进行厚度标定。②理论上探地雷达可以检测压实度、含水量等指标, 但实际

上很难实现,使探地雷达应用范围受到很大限制。造成上述问难的主要原因在于探地雷达基础研究相对滞后,特别是关于路用材料介电特性的研究成果匮乏,严重制约着探地雷达技术的发展和應用。

介质的介电特性决定着电磁波在其中的传播特性,介电特性的差异是探地雷达应用的基础条件。由于对路用材料介电特性的认识尚不深入,通常将多相复合的、有耗的路用材料假定为均质的、无耗的,并采用简化公式计算其介电常数,不仅直接影响探地雷达关于路面结构层厚度的检测精度,而且导致压实度、含水量等指标的检测分析难以实现。

1.2 介质介电特性及其确定方法

1.2.1 介质的介电特性^[49,50]

在介质物理学中,介质的介电特性由介电常数 ϵ 、磁导率 μ 和电导率 σ 来描述。其中 ϵ 反映介质的极化特性, μ 反映介质的磁化特性, σ 反映介质的导电性能。根据焦耳定律, σ 还决定着介质中电磁能量的损耗。下面对极化、电导率、磁导率和介电常数等介电特性的要素作简要介绍。

1. 极化

介质在外加电场的作用下,介质内部的正负电荷将向着相反的方向做微小的运动,致使正负电荷的中心位置不能重合,这种现象称为极化。极化有四种基本形式:电子极化、分子极化、离子极化和表面极化,如图 1.1 所示。非极性介质和极性介质的极化方式不同,对于非极性介质,若在电场作用下发生位移的是核和电子,则称为电子极化;若发生位移的是正负离子,则叫做离子极化。对极性分子,由于内部存在固有偶极矩,在电场作用下,偶极矩要沿电场方向偏转一定的角度,这种由于偶极子转向产生的极化方式称为极性分子的取向极化。表面极化是由于自由电荷在介质表面积聚而产生的一种极化方式。

2. 电导率

电导率描述介质传导电荷的能力,常用 σ 表示,单位为西门子/米(S/m)。

3. 介电常数

介电常数是介质介电特性最重要的参数之一。介质的介电常数描述了介质的极化特性,它反映了处于电场中介质的存储电荷的能力,单位为 F/m。通常,将真空的介电常数 ϵ_0 作为参考值($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-9} \text{ F/m}$),而其他介质的介电常数用与

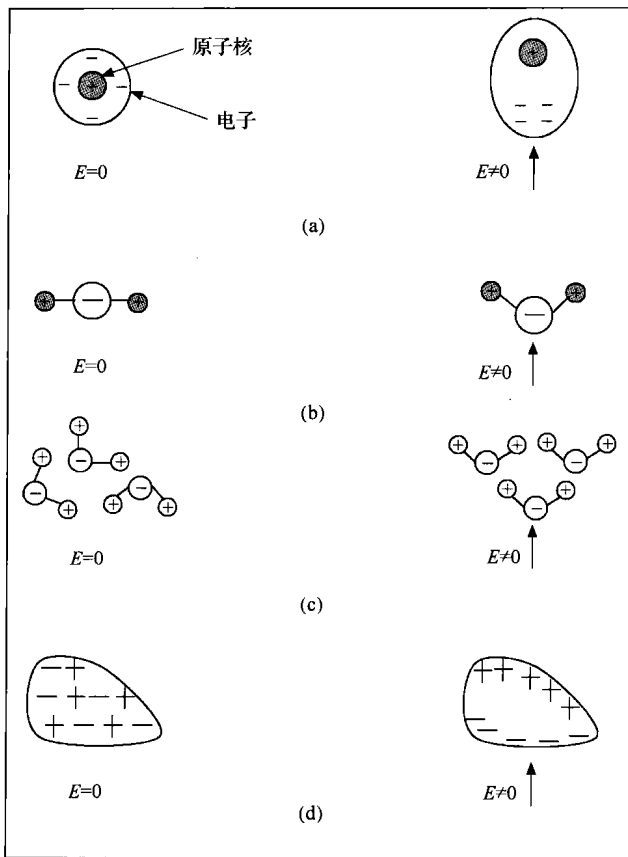


图 1.1 极化的四种类型

(a) 电子极化; (b) 分子极化; (c) 离子极化; (d) 表面极化

真空介电常数的比值来表示,并称之为相对介电常数(也通常称之为介电常数),其定义如下:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (1.1)$$

显然,介质的相对介电常数 ϵ_r 是一无量纲的复数,它的实部 ϵ'_r 表示了介质对电磁波的存储效应,虚部 ϵ''_r 反映了介质对电磁波的损耗特性。在损耗介质中,内部电荷在外电场作用下发生位移摩擦,将部分电磁能转化为热能,转化的多少可用 ϵ''_r 来度量,这种转化使电磁波逐渐衰减,使电磁振荡受到阻尼;而 ϵ'_r 则影响传播波的电场,从而使得电磁场的比值改变,同时还使电磁波的传播速度减慢,并影响到其他一些传播特性。 ϵ''_r 可进一步表示为

$$\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.2)$$

式中, σ 为介质的电导率; ω 为角频率(rad/s)。

从式(1.1)、式(1.2)可看出,介质的介电常数具有频率依赖性,随交变场频率的变化而变化;另外介质的电导率越高,其介电常数的虚部也就越大,对电磁波的吸收能力也越强。表 1.1 给出了常用路面材料介电常数的实部和虚部范围值^[9,19]。

表 1.1 常用路面材料介电常数的实部和虚部值

路面材料	介电常数	
	实部	虚部
空气	1	-0.001
水	81	-0.50
冰	3	-0.05
沥青	4.5~6	-0.035
剥落沥青混凝土	<4	-0.035
湿沥青混凝土	>8	-0.27
干柔性基层	<8	-0.20
湿柔性基层	>12	-0.80
饱和柔性基层	>16	-1.2
湿黏土	>20	-1.50
砂砾路基	8~15	-0.50
旧混凝土	8	-0.47
新混凝土	10~20	-2.2

4. 磁导率

磁导率描述了介质被磁化的能力,单位为亨利/米(H/m)。真空的磁导率为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m,常用 μ_0 表示。其他材料的相对磁导率为该材料的磁导率和真空磁导率的比值,常用 μ_r 表示。根据相对磁导率可将介质分为三类:一类为反磁性材料,其相对磁导率 $\mu_r < 1$,但非常接近 1;另一类为顺磁性材料,其相对磁导率 $\mu_r > 1$,但非常接近 1;还有一类为铁磁性材料,其相对磁导率 μ_r 远远大于 1。通常将反磁性材料和顺磁性材料统称为非磁性材料。

工程中常用的土木建筑材料,大都属于非磁性材料。因此,在以上介电特性参数中,为简化计算常把其磁导率认为是 1,而电导率 σ 对电磁波传播特性的影响根据式(1.2)已蕴涵在介电常数的虚部中。因此,介电常数是土木建筑材料介电性能

最重要的参数。

1.2.2 介电常数的确定方法

1. 利用简化公式计算介电常数

简化公式方法是目前分析探地雷达数据较常用的方法。它通过测量探地雷达反射波的波幅和波峰之间的时延,然后利用介电常数的简化计算公式进行介电常数的求解。由于建立以探地雷达电磁波传播理论为基础的介电常数计算公式十分困难,人们只能根据某些假设建立简化计算公式,于是不同的假设产生了不同的简化公式。通常将路用材料假定为均匀的、各向同性的,并且各结构层介质为非导电性介质,不考虑电磁波在介质传播过程中的衰减,即假定材料介电常数的虚部为0。显然,基于这些假设的介电常数计算公式未能充分反映路用材料的介电特性。特别是对于水泥混凝土等高耗介质,忽略介电常数的虚部会给计算结果带来较大的误差^[41,42],使得该分析方法在实用中具有一定的局限性。

2. 利用钻芯取样标定方法确定介电常数

根据雷达计算厚度的原理,如果通过钻芯得到了结构层厚度,又由雷达得到了电磁波穿过结构层的双程走时,则可以由厚度计算公式反推出介电常数。该法采用分段介电常数均匀一致的假定,即将道路分段并假定每一段介电常数是均匀不变的。显然这种假设与实际情况具有一定的差距。

有时为了标定雷达的测试精度,往往在道路施工过程中在结构层的界面上预先埋置金属薄板(如锡箔纸、钢板等)。当获得结构层厚度后,利用路表和金属薄板两个明显的反射波计算时程差,进而反推介电常数。

3. 利用介电常数仪直接测量介电常数

利用表面介电常数仪直接测量结构层表面的介电常数,如图1.2所示。由于表面介电常数仪的测试深度一般在5cm左右,因此对于厚度较大的结构层来说,这种方法的探测深度显得不足。文献[51]将沥青层中钻取的芯样截断成每5cm一个,分别测得各自介电常数,然后取平均介电常数作为该沥青层的等效介电常数。试验证明该方法能够得到更高精度的沥青层厚度。也有学者采用网络分析仪测试介电常数。网络分析仪主要测试室内试件,利用其进行现场测试会受到一定条件的限制。

4. 基于探地雷达信号反演介电常数

近年来,根据探地雷达信号反演材料的介电常数逐步受到学术界的重视。其



图 1.2 表面介电常数测试仪

基本原理是通过雷达电磁波正演模型模拟雷达反射信号,将其与实测雷达反射信号进行拟合分析,通过调整正演模型参数使其在一定精度下与实测信号达到最佳拟合,从而获得此时雷达电磁波正演模型的参数,并最终获取结构层材料的介电常数。当获得了准确的探地雷达反射信号后,该法对介电常数识别的准确性就取决于雷达电磁波正演模型的合理性和反算方法的有效性。显然,反演方法使对介电常数的研究和分析建立在严谨的理论基础之上,从而可从根本上克服以上几种介电常数确定方法的弊端。

1.3 层状体系介电特性反演理论的发展

层状体系介电特性反演是随着探地雷达技术的发展而形成的前沿学术方向。其基本原理是通过建立探地雷达电磁波在层状体系中的传播模型,即正演模型,来研究雷达电磁波在层状体系中的传播规律,通过参数调整算法使探地雷达电磁波的模拟反射信号与实测反射信号在一定精度达到最佳拟合,进而获取层状体系结构层材料的介电特性,它为实现探地雷达对层状体系结构层厚度、压实度、含水量等指标的快速、连续、无损检测提供了可能。由于介电特性反演从本质上反映了探地雷达电磁波传播的特点,从而将对介电特性的研究和分析建立在了严谨的理论基础之上,从根本上克服了现有几种介电常数分析方法的弊端。

合理的雷达电磁波正演模型、快速有效的反演方法和准确的雷达电磁波实测信号是层状体系介电特性反演分析方法得以实施的三个条件。目前国内外在探地雷达硬件研制方面已有相当成熟的技术,能够提供高精度的雷达电磁波反射信号。因此,如何建立合理的层状体系雷达电磁波传播模型和高效稳定的模型参数调整算法就成了实现介电特性反演的关键。

国内外不少学者围绕雷达波传播模型以及反演方法开展了相关研究^[36~40,52~55]。早期的研究仅局限于在低耗或无耗介质中分析电磁波的动力学特性,即不考虑介电常数虚部对电磁波传播的影响。而对于道路、机场、堤坝等工程结构,常用的材料大多为有耗介质,显然在雷达波传播模型中忽略介电常数虚部是与工程实际不相符的,特别是当材料为高耗介质时会产生较大的误差。目前,探地雷达检测路面厚度之所以精度尚不令人满意,其主要原因在于介电常数计算中未考虑其虚部。因此,研究有耗介质中雷达电磁波的传播规律及其正演模拟技术具有重要的理论意义和工程应用价值。但目前关于层状体系结构层雷达回波模拟方面的研究还不成熟。如何建立合理的雷达电磁波在层状体系中的传播模型,特别是全面考虑介电常数实部与虚部的影响,是研究介电特性反演的基础。

多相复合材料介电特性模型揭示了材料介电常数与压实度、含水量等指标的本质关系。一旦建立复合材料介电特性模型,即可根据探地雷达信号反演其固相、液相和气相各组分的体积率,进而计算压实度、含水量等指标。虽然国内外关于介电特性模型进行了不少研究,并提出了许多模型^[56~65]。但这些模型均是基于一定假设,在特定情况下才成立的经验模型,关于道路、堤防材料复合介电特性模型的成果甚少。因此,应用探地雷达技术检测压实度、含水量等指标尚处于探索阶段。

层状体系介电特性反演涉及电磁学、数学、材料等学科专业和道路、机场、堤防等工程领域。由于问题的复杂性,现有研究大都采用试算法调整电磁波传播模型参数^[54],即通过人工试算调整正演模型参数,使用逐步逼近的方式去拟合实测雷达波反射信号,由此来确定材料的介电特性。这种方法带有较强的人为主观性和随意性,往往要求分析计算人员具有较强的实际工程经验,能够根据模型分析结果有针对性地调整有关参数。由此可以理解为什么有人将探地雷达看做是30%的技术、70%的艺术的原因。因此,如何建立高效稳定的参数调整算法,减少人为因素,使对介电特性的分析建立在严密的理论基础上,显得尤为重要。

1993年,王复明和 Lytton 在国际上首次提出了路面结构模量反演的系统识别方法^[66],解决了路面结构反演方程的收敛性问题。在此基础上,作者系统研究了层状体系力学特性^[67~69]和介电特性反演理论^[41~43]。2003年,张蓓在其博士论文中建立了全面考虑介质介电常数实部和虚部的路面结构探地雷达电磁波正演模拟的多频成分合成方法,并基于该传播模型建立了路面结构介电特性反演分析的系统识别方法及厚度分析方法,开发了路面结构介电特性反演及厚度分析软件 SIDTHK,成功地将合理的雷达电磁波正演模型和高效稳定的参数反演方法结合起来,有效地提高了探地雷达对路面结构层厚度的检测精度^[41]。2006年,在上述工作的基础上,钟燕辉在其博士论文中进一步发展了层状均匀体系介电特性反演理论,建立了层状体系结构多层厚度分析方法。通过研究沥青混合料和水泥混合料等路用材料的复合介电常数模型,揭示了多相材料复合介电特性与压实度、孔