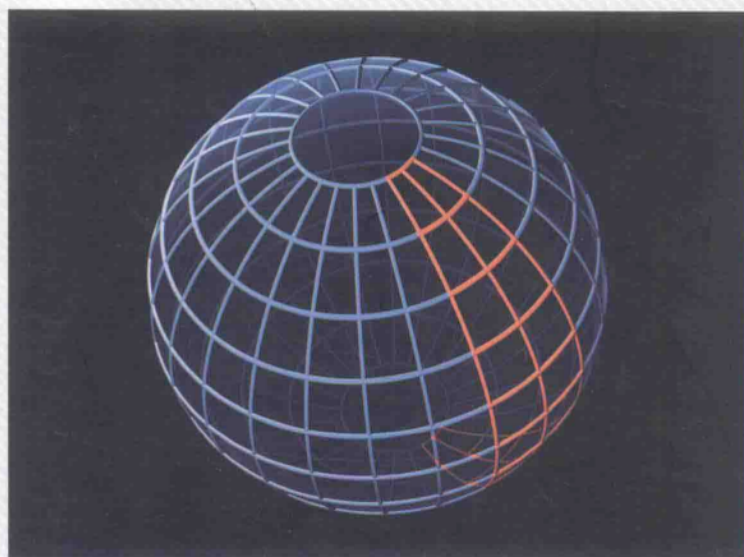


多相离散随机介质 及其探地雷达数值模拟

DUOXIANG LISAN SUIJI JIEZHI
JIQI TANDI LEIDA SHUZHI MONI

郭士礼 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

多相离散随机介质及其探地雷达数值模拟

DUOXIANG LISAN SUJJI JIEZHI JIQI TANDI LEIDA SHUZHIMONI

郭士礼 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

多相离散随机介质及其探地雷达数值模拟/郭士礼著. —武汉:中国地质大学出版社,2016.

7

ISBN 978-7-5625-3811-0

I. ①多…

II. ①郭…

III. ①探地雷达-数值模拟

IV. ①TN959.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 160745 号

多相离散随机介质及其探地雷达数值模拟

郭士礼 著

责任编辑:王 敏

责任校对:戴 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:220 千字 印张:8.25

版次:2016 年 7 月第 1 版

印次:2016 年 7 月第 1 次印刷

印刷:武汉三新大洋数字出版技术有限公司

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3811-0

定价:35.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

探地雷达方法具有高分辨率、高效率、连续、无损等优点,已成为浅层结构勘探领域最重要的物探方法之一,尤其是在公路工程、建筑工程等浅层工程质量无损检测工作中发挥了重要作用。我国高速公路结构层通常采用沥青混凝土面层加半刚性基层的形式,当探地雷达应用于公路结构层厚度检测与病害(如裂缝、脱空、不均匀沉降、疏松等)调查时,通常将公路结构层材料简化为均匀介质或层状均匀介质,并由此建立相应的公路工程质量探地雷达检测理论与资料处理解释方法。而实际的公路结构层材料(如沥青混凝土、水泥稳定碎石等)是由多种物质按照一定的体积百分比组合而成的多相非均质混合物。以沥青混凝土为例,它是由骨料、沥青胶浆、空气按照一定的体积百分比混合而成的多相非均质混合物,其骨料、沥青胶浆和空气的体积不等,粒径多尺度,几何形状各异,电磁性质不同,位置在空间上随机分布,具有明显的多相、离散、随机介质特性。

高频电磁波在多相离散随机介质中传播时,会发生散射,造成大量的不相干波至,致使接收波形也具有相应的随机特征。尤其是路用探地雷达天线的主频较高,探测波长较短(约为最大粒径的3~5倍),散射相对较大,使得介电特性在介质空间上随机分布引起的波场变化被相对放大,将十分明显地影响高频电磁波的传播。因此,对于高频电磁波来说,沥青混凝土的物性参数变化剧烈,电磁散射严重,无法简化为均匀介质,而应依据电磁参数在沥青混凝土空间上具有多相、离散、随机分布的特征,建立更符合其实际情况的多相离散随机介质模型。数值模拟探地雷达波在其中的传播特征为提高探地雷达探测分辨率,改进数据处理方法,以及为定量解释工程材料介质属性提供理论基础和科学依据,具有重要的科学意义和应用价值。

本书在建立符合沥青混凝土实际情况的多相离散随机介质和探地雷达蝶形天线数学模型的基础上,研究了探地雷达波场特征与多相离散随机介质参数、工程材料电性参数、典型工程缺陷之间的对应关系。本书的主要内容包括:

(1)采用时域有限差分方法设计并实现了适用于随机介质的探地雷达三维正演数值模拟算法,为分析随机介质中的探地雷达波场提供了有力工具。

(2)基于商用探地雷达平面蝶形天线的几何尺寸、电阻加载方式、激励及屏蔽吸波机理,采用时域有限差分方法建立了商用探地雷达蝶形天线的三维模型,通过三维数值模拟研究了蝶形天线几何学特征、电阻加载、屏蔽腔和吸波材料、介质介电特性等对蝶形天线辐射的影响,为验证、改进探地雷达蝶形天线的辐射性能提供了科学依据。

(3)采集了12个高速公路沥青混凝土典型芯样,实验测量了其组成材料的介电常数,分析了沥青混凝土路面不同结构层介电常数的空间随机分布特征,计算了其自相关函数,并估计了自相关长度、自相关角度,确定了其随机介质类型;通过改进随机介质建模方法,建立了多个符合沥青混凝土路面不同结构层介质实际情况的多相离散随机介质模型,为三维正演数值模拟

探地雷达高频电磁波在沥青混凝土介质中的波场传播特征提供了基础,同时该项研究成果也为探地雷达资料的解释和反演提供了新的理论基础。

(4)通过基于多相离散随机介质模型的三维探地雷达波场的数值模拟,检验了两种基于组成材料介电常数及其体积含量百分比的混合物等效介电常数计算模型的正确性和准确性。

(5)模拟实际沥青混凝土路面结构及其组成材料,建立了不同空隙率的多相离散随机介质模型,通过三维数值模拟研究了沥青混凝土各结构层不同空隙率对探地雷达波场特征的影响,提出了定量计算沥青混凝土路面不同结构层空隙率的方法,为探地雷达定量检测沥青混凝土路面不同结构层的空隙率提供了理论基础。

(6)研究了多相离散随机介质中不同宽度的垂向裂缝、不同厚度的层间脱空相应的探地雷达波场变化规律,为定量计算裂缝的宽度、层间脱空的厚度提供了科学依据。

本书以“多相离散随机介质及其探地雷达数值模拟”为中心,共分6章。

第1章为绪论。简要地阐述了本书写作的目的和意义,分析了国内外研究现状及存在的问题,简述了本书的主要内容。

第2章主要介绍探地雷达的理论基础与数值模拟方法。简要介绍了探地雷达系统组成与电磁波的基本传播理论,讨论了时域有限差分原理、迭代公式、数值稳定性与数值色散条件等;着重推导了UPML吸收边界条件的迭代公式,最后通过实例展示了UPML吸收边界条件的有效性。

第3章主要讨论探地雷达蝶形天线的数值模拟方法。分析了探地雷达蝶形天线所具有的方向性、极化特性、振铃效应、屏蔽设计以及地下介质对蝶形天线的加载作用等特点;根据商用蝶形天线的几何学特征、激励波形、电阻加载方式及屏蔽吸波机理建立了其时域有限差分模型;数值模拟了蝶形天线的几何学特征、电阻加载方式、屏蔽吸波材料,天线离地高度和地下介质介电特性对蝶形天线辐射特性的影响。

第4章为沥青混凝土介质类型与特征及其建模研究。根据不同沥青混凝土路面结构层芯样测量结果及其横、纵切片的介电常数分布图,研究了沥青混凝土路面不同结构层介电常数在空间上的随机分布特征,估算了其自相关长度、自相关角度及自相关函数的类型;提出了多相离散随机介质的建模方法,建立了不同沥青混凝土路面结构层的多相离散随机介质模型。

第5章针对不同空隙率的沥青混凝土多相离散随机介质模型,采用线性模型、CRIM模型估算了不同空隙率的多相离散随机介质模型等效介电常数,并对空隙率为4%的多相离散随机介质及其相应的等效介电常数均匀介质进行了基于探地雷达蝶形天线的三维正演数值模拟,对比了多相离散随机介质和均匀介质的探地雷达波场特征,同时验证了等效介电常数估算结果的准确性。基于探地雷达蝶形天线的波场特征,提出了定量计算不同高速公路沥青混凝土路面结构层空隙率的方法;研究了多相离散随机介质中裂缝宽度与其顶部中点处振幅强度之间近似线性的变化规律;研究了多相离散随机介质中层间脱空厚度与其反射波振幅强度之间的对应变化规律,为定量计算裂缝宽度、层间脱空厚度提供了科学依据。

第6章全面总结了本书的主要内容,阐述了存在的问题及以后的研究方向。

全书由郭士礼执笔,中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院朱培民教授、黄淮学院建筑工程学院李修忠教授在百忙之中审阅了书稿的全部内容,提出了许多宝贵的意见,作者在

此表示衷心的感谢！在本书写作过程中得到河南交通投资集团有限公司科研工作站博士后导师王辉的悉心指导，以及河南高速公路试验检测有限公司总经理冀孟恩、副总经理闫飞和河南省路通物探科技开发有限公司的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！另外，本书的出版还得到了河南省博士后科研项目经费资助，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，殷切希望广大读者、专家学者批评指正！

作 者

2016年2月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.2.1 路面结构层材料介电特性的研究现状	(2)
1.2.2 随机介质模型的研究现状	(3)
1.2.3 探地雷达蝶形天线 FDTD 建模与模拟的研究现状	(3)
1.2.4 探地雷达三维数值模拟的研究现状	(4)
1.2.5 存在的问题	(5)
1.3 主要内容概括	(5)
2 探地雷达的理论基础与数值模拟	(7)
2.1 探地雷达的理论基础	(7)
2.1.1 探地雷达系统组成及工作原理	(7)
2.1.2 麦克斯韦方程组与本构关系	(8)
2.1.3 电磁场波动方程	(8)
2.1.4 电磁波的辐射	(9)
2.1.5 电磁波的散射	(10)
2.2 探地雷达波场的数值模拟	(11)
2.2.1 麦克斯韦方程的 FDTD 格式	(11)
2.2.2 数值稳定性与数值色散	(14)
2.2.3 UPML 吸收边界条件	(14)
3 探地雷达蝶形天线的数值模拟	(23)
3.1 探地雷达蝶形天线	(23)
3.1.1 商用探地雷达天线	(23)
3.1.2 商用探地雷达蝶形天线的基本特征	(23)
3.2 探地雷达蝶形天线的 FDTD 建模	(24)
3.2.1 商用探地雷达蝶形天线的基本结构	(24)
3.2.2 脉冲激励源	(25)
3.2.3 天线金属斜边的处理	(27)
3.2.4 天线加载电阻	(28)

3.2.5	屏蔽腔和吸波材料	(31)
3.3	影响蝶形天线辐射特性的因素	(32)
3.3.1	蝶形天线的几何学特征	(32)
3.3.2	加载电阻及屏蔽腔的影响	(35)
3.3.3	天线离地高度的影响	(37)
3.3.4	地下介质介电常数的影响	(37)
3.3.5	地下介质电导率的影响	(40)
3.4	小结	(41)
4	沥青混凝土介质类型与特征	(42)
4.1	高速公路沥青混凝土路面概述	(42)
4.2	沥青混凝土组成材料及其介电常数	(42)
4.2.1	豫西某高速公路沥青混凝土路面及其组成材料	(42)
4.2.2	材料介电常数的测量与估算	(45)
4.2.3	沥青混凝土芯样及切片	(46)
4.2.4	沥青混凝土介电常数的分布特征	(48)
4.3	沥青混凝土介质类型的估算与建模	(52)
4.3.1	估算自相关函数的特征参数	(52)
4.3.2	多相离散随机介质模型的建模方法	(60)
4.3.3	自相关函数类型的拟合与随机介质建模	(62)
4.3.4	模型参数对多相离散随机介质模型的影响	(69)
4.3.5	多相离散随机介质模型的二维正演模拟	(73)
4.4	小结	(76)
5	多相离散随机介质探地雷达三维正演模拟及分析	(78)
5.1	空隙率对探地雷达波场的影响	(78)
5.1.1	不同空隙率的多相离散随机介质三维模型	(78)
5.1.2	多相离散随机介质探地雷达三维正演模拟	(82)
5.1.3	多相离散随机介质与均匀介质的波场对比	(84)
5.1.4	空隙率对探地雷达波场的影响	(90)
5.1.5	不同空隙率层状多相离散随机介质的波场特征	(97)
5.1.6	自相关长度对探地雷达波场的影响	(101)
5.2	公路工程典型缺陷的探地雷达波场特征	(102)
5.2.1	裂缝的探地雷达波场特征	(105)
5.2.2	层间脱空的探地雷达波场特征	(106)
5.2.3	空洞的探地雷达波场特征	(109)
5.3	小结	(111)

6 结论与建议	(113)
6.1 主要工作	(113)
6.2 存在的问题及今后研究方向	(114)
参考文献	(116)

1 绪 论

1.1 引言

高速公路是我国重要的交通基础设施,截至 2012 年底我国高速公路通车总里程已达 9.56×10^4 km。为了确保高速公路的运营安全,路面结构层的施工质量检测与后期隐蔽病害普查尤为重要。以钻孔取芯为代表的传统公路质量检测方法,不仅效率低、随机性大、代表性差,而且会对高速公路路面造成一定程度的破坏,因此急需发展快速、方便、高效的无损检测技术。探地雷达(Ground - Penetrating Radar,简称 GPR)技术是近半个世纪发展起来的高精度、高效率、连续、无损的探测技术,是目前公路工程质量检测与隐蔽病害检测最为活跃、最为有效的技术之一。迄今为止,它已成功地应用于高速公路路面结构层的厚度检测、隐蔽裂缝检测、层间脱空检测、不均匀沉降变形检测、桥梁质量检测 and 隧道质量检测。

探地雷达探测的基本原理是:探地雷达发射天线激发高频电磁波,并传播到地下或公路介质中,反射或散射回来的电磁波信号经接收天线被记录下来,经过适当处理,可以获取被探测对象的图像。由于电磁波在地下的传播形式与地震波比较相似,探地雷达的工作方式也类似于地震勘探,探地雷达获得的数据剖面也类似于反射地震数据剖面,因此在长期实际工作中,主要借助于地震勘探的理论、观点来分析 and 处理探地雷达资料。然而,与地震勘探相比,探地雷达公路工程无损检测,无论是探测对象还是探测机理都有很大不同。

首先,地震勘探的对象多是几百米至上千米的中、深层介质,而探地雷达公路工程无损检测的对象通常是 $0 \sim 1$ m 深度范围的极浅层介质。作为地震勘测对象的中、深层介质,由于形成的时间较早,经受了较长的沉积和压实作用,基本上可以认为是层状介质。而探地雷达公路工程无损检测的对象是公路工程材料,公路工程材料(如沥青混凝土、水泥稳定碎石等)是由多种物质按照一定的体积百分比组合而成的多相非均质混合物。以沥青混凝土为例,它是由骨料、沥青胶浆、空气按照一定的体积百分比混合而成的多相非均质混合物,其骨料、沥青胶浆和空气的体积不等,粒径多尺度,几何形状各异,电磁性质不同,位置在空间上随机分布,具有明显的多相、离散、随机介质特性。这类介质相对于高频电磁波波长来说,物性参数变化剧烈,无法用均匀介质或水平层状均匀介质等确定性的方法来准确、完整地描述。

探地雷达天线激发的电磁波在介电特性空间随机分布的双相介质中传播时,会发生散射,造成大量的不相干波至,导致接收波形也具有相应的随机特征。由于路用探地雷达蝶形天线的主频比较高,探测波长较短,散射相对较大,使得介质介电特性在空间上随机分布引起的波场特性随机起伏被相对放大。传统的基于均匀介质或层状均匀介质理论的公路

工程探地雷达资料解释方法,无形中放弃了大量的、潜在的、有价值的信息,研究和利用这些信息,相信能提高公路工程质量检测分辨率,分辨出更多的材料属性信息和公路病害。因此,建立符合实际公路工程材料介电特性空间随机分布特征的随机介质模型,通过研究随机介质模型参数与探地雷达波场特征的相应变化规律,是定量评估公路工程介质材料的物质基础。

其次,地震勘探与探地雷达的探测机理不同。地震勘探利用的是地震波,主要基于介质之间的弹性差异,而探地雷达探测利用的是电磁波,主要基于介质之间的电性差异。地震波与雷达波既有相似性,也有很多不同之处。电磁波包括近场电磁波和远场电磁波,远场电磁波与地震勘探中所使用的地震波有相似的传播特性,而近场电磁波则较远场电磁波要复杂得多。近场电磁波主要以似稳场和感应场的形式传递,其场强不仅与距离有关,还与探地雷达天线的类型、尺寸、主频、方向性及探测对象的电性参数有关。当探地雷达应用于冰川、冻土等近似于无耗介质时,雷达波的探测深度(h)通常大于10个中心频率波长(λ),此时远场电磁波起主导作用,运用地震勘探的理论方法可以获得较好的效果。而在损耗介质中,探地雷达的探测深度通常为中心频率波长的几倍,此时近场电磁波起主导作用,属于电磁场近场问题。特别是探地雷达应用于公路结构层质量无损检测时,其探测对象是深度多在1m以内甚至在几厘米以内的极浅层介质,是典型的近场问题。因此,应建立探地雷达蝶形天线的数学模型,研究探地雷达蝶形天线的辐射特性及其在随机介质中的电磁场近场特征,是提高探地雷达探测效果和解释准确性的理论基础。

为了研究公路工程材料随机介质参数、介电特性与探地雷达波场特征之间的对应关系,本书采用钻孔取芯的方法获取高速公路沥青混凝土不同结构层的二维横、纵切片,实验测量其组成材料的介电常数,统计沥青混凝土不同结构层介电常数在空间上的随机分布特征,构建了符合实际公路工程材料介电特性空间分布特征的多相离散随机介质模型;基于商用探地雷达蝶形天线的几何学特征、电阻加载方式及屏蔽吸收机理进行探地雷达三维正演数值模拟,研究探地雷达波场特征与多相离散随机介质参数、工程材料介电特性的对应关系;本书的研究成果可以丰富和发展基于随机介质的探地雷达波场传播理论,指导并应用于探地雷达无损检测高速公路路面结构层,具有十分重要的理论意义和实用价值。

1.2 国内外研究现状

针对与本书写作内容密切相关的路面结构层材料介电特性、随机介质模型理论、探地雷达蝶形天线的时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain,简称FDTD)方法建模与模拟、探地雷达三维正演数值模拟4个方面进行了国内外研究现状调研。

1.2.1 路面结构层材料介电特性的研究现状

公路路面结构层材料之间的介电特性差异是探地雷达应用于高速公路沥青混凝土路面结构层质量检测和隐蔽病害调查的基础与前提。研究高速公路沥青混凝土路面结构层材料的介

电特性,有利于建立符合实际高速公路沥青混凝土路面结构层介电特性的地电模型,掌握电磁波与材料介电特性之间的相互作用机理,提高探地雷达资料解释的正确性和典型目标体雷达波场特征的辨识能力。

随着探地雷达技术广泛应用于公路工程质量检测及隐蔽病害调查,国内外关于公路工程材料介电特性的研究越来越多,主要集中于:①利用介电常数测试仪或网络分析仪测量沥青混凝土路面结构层及其主要组成材料的介电常数(Alqadi, Hazim, 1995; Rhim, Buyukozturk, 1998; Robert, 1998; Shang et al., 1998),总结热拌沥青混凝土的介电特性特征(郭成超, 2004);②研究沥青混凝土等效介电常数与其组成材料的介电常数及其体积含量百分比之间的关系(钟燕辉等, 2006),并据此提出了多种沥青混凝土等效介电常数计算模型(Soutsos et al., 2001; Van Damme et al., 2004; Adous et al., 2006; Filali et al., 2006; Wang et al., 2006; Ekblad and Lascsson, 2007);③实验测量沥青混凝土等效介电常数与密度、强度、含水量、压实度、空隙率的对应关系(张勇, 2005; 杨兵, 2010);④分析了路面结构层材料介电特性对雷达电磁波反射信号的影响(张蓓, 2003);⑤层状非均匀介质的介电特性实验。蔡迎春等(2009)针对实际路面材料颗粒的随机分布特点以及离散颗粒对电磁波的散射事实,认为基于路面材料的非均匀介质等效介电常数的估计更加符合工程实际。

1.2.2 随机介质模型的研究现状

国内外关于随机介质模型及其波场传播特征的研究已有多年,取得了一定的成果。Ikelle等(1993)提出把具有大量的、随机分布的、小尺度异常的复杂非均匀介质看成随机介质,使用统计学方法可以灵活、方便、完整地描述复杂的非均匀介质中大量细小而又无法忽略的异常。用统计学方法描述的非均匀介质模型就是随机介质模型。

Kneib和Kerner(1993)针对随机介质有限差分数值模拟中常出现的问题,提出了随机介质有限差分模拟的精度和有效性的要求。Frenje和Juhlin(1998)根据声波测井曲线的数字特征生成了随机介质模型。日本京都大学和地球科学综合研究所(Rie Kamei, 2005)基于P波测井速度统计特性,针对富含甲烷水合物带的特性,构造了具有双峰分布的随机非均匀速度的模型。

在国内,中国地质大学(武汉)的奚先和姚姚(2001)提出了混合型随机介质模型的概念,通过选择在水平方向和垂直方向上的自相关长度 a 、 b 以及粗糙度 r ,可以产生出各种不同形式的混合型随机介质模型,能更加灵活、准确地描述实际介质。随后,他们又发展了多尺度随机介质模型(姚姚,奚先, 2004)、非平稳随机介质模型(奚先,姚姚, 2005)和随机溶洞介质模型(奚先等, 2005),并通过波动方程交错网格有限差分正演(姚姚,奚先, 2002、2004)模拟了地震波在二维弹性随机介质中的传播及其自激自收时间记录。李灿莘等(2010)利用Von Karman型自相关函数建立了随机介质模型,分析了不同自相关长度、谱指数和扰动标准差下模型中速度的分布和变化情况。

1.2.3 探地雷达蝶形天线FDTD建模与模拟的研究现状

探地雷达蝶形天线为地面耦合天线,为了尽量将电磁波能量耦合到地下介质中去,通常工

作于近地表面,此时地下介质会对天线产生加载作用,从而影响探地雷达蝶形天线的辐射特性。因此,基于商用探地雷达蝶形天线的几何学特征、电阻加载方式、屏蔽吸波机理,模拟在不同的地下介质环境中天线的辐射特性和波场特征极其重要。

探地雷达蝶形天线的辐射特性与其基本结构的几何学特征、电阻加载方式及屏蔽吸收机理密切相关。臂长和张角是蝶形天线的主要几何学特征,研究表明,蝶形天线的臂长越长,低频特性越好(周蔚红,2006),张角越大,带宽越宽(Lampe et al.,2003;Uduwawala et al.,2004);标准蝶形天线通常由两个等腰金属三角形组成,由于FDTD矩形网格无法处理金属斜边边缘,蝶形天线的金属三角形斜边通常采用梯形网格近似(Bourgeois,Smith,1996)和环路积分法来保证模拟的精度,其中环路积分法比梯形网格近似法更能获得准确的天线输入阻抗(Nishioka et al.,1999)。

标准蝶形天线存在末端电流反射,会造成辐射波形拖尾,通常采用电阻加载的方法进行处理。目前蝶形天线的电阻加载方式主要有分布式电阻加载(刘立业,2005;刘立业等,2006)和末端集中加载(Lampe,Holliger,2005)两种,加载电阻的阻值及位置会明显影响蝶形天线的辐射特性(Uduwawala,Norgren,2006)。为了减小外界电磁干扰和抑制波形拖尾,背腔屏蔽(刘立业等,2006)及吸波材料(郭晨等,2010)的设计至关重要。吸波材料对于多次反射及拖尾的抑制效果良好,同时背腔式设计的探地雷达收发天线可以克服传统蝶形天线在 H -Plane全向辐射所带来的缺点,从而提高雷达系统的信噪比及收发天线之间的隔离度。另外,由于探地雷达蝶形天线通常采用近地工作模式,地下介质的介电特性也会对蝶形天线的辐射特性产生影响(Lampe,Holliger,2003;Uduwawala et al.,2005)。

1.2.4 探地雷达三维数值模拟的研究现状

探地雷达正演模拟是分析和研究电磁波在介质中传播规律的有效途径,同时也是探地雷达理论研究的主要内容之一。目前国内外在探地雷达正演模拟方面的研究文献很多。由于二维模拟无法提供探测目标体的形状、空间分布、延伸走向等方面的详细信息,开展三维探地雷达正演模拟研究尤为重要。

常用于探地雷达正演模拟的数值方法主要有射线追踪方法、有限元方法和时域有限差分方法,每种方法都有它的优缺点。射线追踪方法因计算速度快、结果直观,在层析成像技术、偏移、反演及模型计算中都占有重要的地位。有限元方法适于模拟较复杂的介质,具有较强的稳定性。有限差分方法结果直观、网格剖分简单,显示出其独特的优越性,已成为探地雷达三维正演模拟的有效手段。

为了模拟无限介质,探地雷达数值模拟需要设计吸收边界条件。李静等(2010)推导了三维单轴各向异性完全匹配层(Uniaxial Medium Perfectly Matched Layer,简称UPML)吸收边界条件的计算公式,编写了三维FDTD正演模拟程序。UPML吸收边界条件在吸收效果、反射误差及计算效率等方面,都明显优于常用的Mur、PML吸收边界,具有较好的吸收效果。类似的研究可以参考舒志乐(2010)、刘磊等(2009)、刘新荣等(2010)、葛德彪等(2011)的工作。

近年来基于随机介质模型探地雷达正演模拟的研究有少量的文献报道。曹中林(2007)采用统计学方法构造二维高斯随机介质模型,利用FDTD法结合UPML吸收边界,实现了随机

介质模型的探地雷达正演模拟,并分析了随机介质的自相关长度、扰动偏差等因素对随机介质中管线的电磁波响应特性的影响,所得出的结果对野外资料解释有一定的指导意义。吴丰收(2009)开展了基于随机介质的混凝土体探地雷达探测信号的研究与分析工作,分别模拟了混凝土体的相对介电常数和电导率发生不同随机变化的探地雷达信号特征。

1.2.5 存在的问题

(1)关于沥青混凝土介电特性空间不均匀和随机分布特征方面的研究不足。

过去的研究中,常将沥青混凝土假定为均匀介质或层状均匀介质,并根据沥青混凝土组成材料的介电常数及其体积含量百分比来计算其等效介电常数,忽略了沥青混凝土介电特性的空间不均匀或随机分布特征及电磁波散射引起的大量不相关波至,不仅直接影响了探地雷达资料的解释精度,而且导致无法定量评价沥青混凝土的空隙率、压实度等属性信息。

(2)基于商用探地雷达蝶形天线的三维正演数值模拟及其波场特征的研究较少。

目前,探地雷达三维正演模拟的激励源倾向于采用较为简单、理想化的点源,而不是真实化的天线体。而点源与探地雷达蝶形天线有很大差异,如探地雷达蝶形天线具有方向性、极化特性、振铃效应、屏蔽设计以及地下介质对蝶形天线有加载作用,这些特性都是点源无法模拟的。目前探地雷达蝶形天线数值模拟的研究者以天线的设计人员为主,他们优化和改进天线的辐射波形和辐射特性。很少的研究者把商用探地雷达蝶形天线和真实化的地质模型结合起来研究地下目标体的波场特征。

为了与实际探地雷达资料作对比,探地雷达正演模拟应建立在符合实际介质介电特性的介质模型与商用探地雷达蝶形天线数学模型的基础上,只有这样探地雷达正演模拟的结果与实际探地雷达探测资料才具有可比性,模拟结果才更贴近实际,更具有实用价值。

(3)关于随机介质模型的探地雷达波场特征方面的研究不足。

目前关于随机介质模型及其地震波场特征的研究较多,而随机介质模型的雷达波场特征及随机介质的模型参数与探地雷达波场特征的对应关系方面的研究较少。

1.3 主要内容概括

本书的主要内容包括以下3个方面:

(1)研究沥青混凝土介质的类型与特征,建立符合其介电特性空间随机分布特征的介质模型。主要通过钻孔取芯的方法获取高速公路沥青混凝土路面不同结构层的沥青混凝土二维切片,实验测量其主要组成材料的介电常数,获取沥青混凝土介电常数的空间分布图,计算其自相关函数及其自相关长度、自相关角度,拟合自相关函数的类型。根据沥青混凝土介电常数的空间分布特征,改进随机介质模型的建模方法,构建符合沥青混凝土介电常数空间随机分布特征的随机介质模型。

(2)商用探地雷达蝶形天线及探地雷达三维数值模拟算法设计。基于商用探地雷达蝶形天线的几何学特征、电阻加载方式、激励及屏蔽吸波机理,采用时域有限差分方法建立不同主

频商用探地雷达蝶形天线的三维模型,数值模拟蝶形天线的辐射模式及其在不同介质环境中的波场特征。

(3)随机介质的模型参数与探地雷达波场特征之间的对应关系研究。对不同特征参数的随机介质模型进行正演模拟,分析波场特征与物性参数的对应关系,研究典型工程缺陷介质所对应的探地雷达波场特征。

2 探地雷达的理论基础与数值模拟

2.1 探地雷达的理论基础

2.1.1 探地雷达系统组成及工作原理

探地雷达是利用高频脉冲电磁波的反射来探测地下介质分布的一种地球物理勘探方法。探地雷达具有高精度、高效率、连续、无损等优点,已经成为高速公路质量无损检测和隐蔽病害调查的重要工具,代表了公路工程质量检测技术的发展方向。

探地雷达系统一般由发射天线系统、接收天线系统、控制单元及计算机系统组成(Harry, 2009;杨峰等,2009),如图2-1所示。

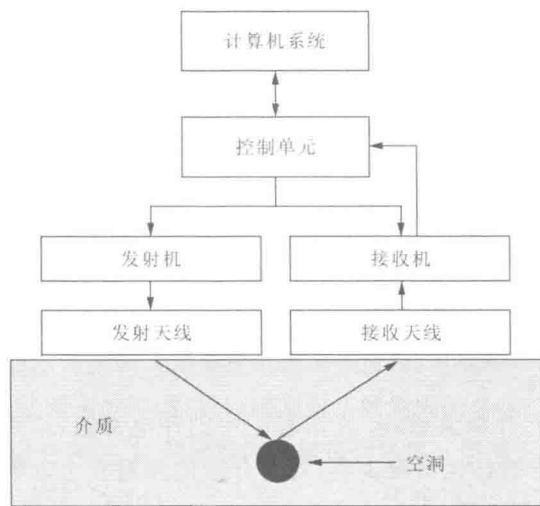


图 2-1 探地雷达系统组成示意图

探地雷达的发射天线将发射机产生的高压窄脉冲电信号转换为高频电磁波向地下介质辐射,电磁波在地下介质中传播时,遇到电性差异的界面或目标体会发生反射和散射,返回地面的电磁波为接收天线所接收,放大后形成接收信号,由计算机系统实时显示地下介质的雷达剖面图。根据接收波形、振幅强度、双程走时等参数可判释地下介质的电性质、位置及几何形态。

2.1.2 麦克斯韦方程组与本构关系

探地雷达的理论基础是电磁波基本理论。麦克斯韦方程组是研究电磁理论的基本方程,它描述了电场和磁场之间以及电荷和电流之间的相互关系,同时包含了介质的电性参数,是定量分析探地雷达信号的理论基础。

微分形式的麦克斯韦方程组可描述如下:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2-4)$$

上式中, \times 表示矢量叉乘; \cdot 表示矢量点乘; \mathbf{H} 表示磁场强度(A/m); \mathbf{E} 表示电场强度(V/m); \mathbf{D} 表示电位移(C/m^2); \mathbf{B} 表示磁感应强度(T); \mathbf{J} 表示电流密度(A/m^2); ρ 表示电荷密度(C/m^3); ∇ 表示为:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

研究高频电磁波在地下介质中的传播规律,需要结合介质电性参数对电磁场量的影响,即介质的本构关系。在线性、各向同性介质中,其本构关系为:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2-5)$$

式(2-5)中, σ 表示介质的电导率(S/m); ϵ 表示介质的介电常数(F/m); μ 表示介质的磁导率(H/m)。

电导率 σ 是表征介质导电能力的参数。介质的电导率越大,电磁波的衰减越大;介质的电导率越小,电磁波的衰减越小。探地雷达应用于低电导率($\sigma < 10^{-7} \text{ S/m}$)介质时,具有较深的探测深度和较好的探测效果。

介电常数 ϵ 是表征介质极化程度的参数。通常而言,介质的介电常数越大,其绝缘能力越强。通常以无量纲的相对介电常数 ϵ_r 来表述介质介电常数的相对大小,表达式为:

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (2-6)$$

式(2-6)中, ϵ 表示介质的介电常数; ϵ_0 表示真空中的介电常数, $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。本书以后章节所说的介电常数如无特殊说明,均为介质的相对介电常数 ϵ_r 。在探地雷达的应用中,介电常数是介质的电性参数。介质的介电常数越大,电磁波在介质中的传播速度越慢;介电常数越小,电磁波在介质中的传播速度越快。在介电常数不同的两种介质的分界面处会发生电磁波反射,反射的强弱与两种介质介电常数的差异大小成正比。

磁导率 μ 表征介质在磁场作用下产生磁感应能力的强弱。探地雷达应用中的绝大多数工程介质都是非铁磁性物质,磁导率对电磁波传播特性的影响很小,不作考虑。

2.1.3 电磁场波动方程

麦克斯韦方程组描述了变化的磁场产生电场,变化的电场又产生磁场,在时变的情况下电