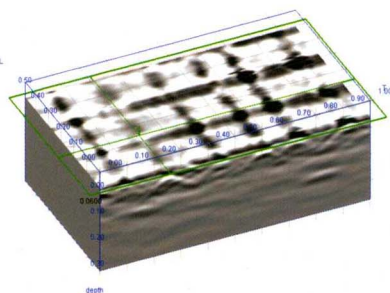


“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书 · 公路基础设施建设与养护

Application Research of
Ground Penetrating Radar Technology in
Nondestructive Testing of Concrete Bridges

探地雷达技术在 混凝土桥梁无损检测中的应用



谢 峻 高小妮 著
郑晓华 何小钰



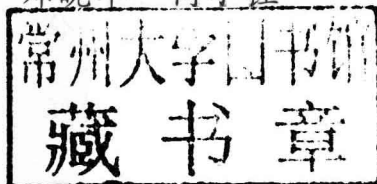
人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

“十三五”国家重点图书出版规划项目

交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

探地雷达技术在混凝土桥梁 无损检测中的应用

谢峻 高小妮 著
郑晓华 何小钰



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书内容主要包括探地雷达技术在混凝土结构检测中的应用现状、探地雷达检测混凝土桥梁基础、探地雷达检测混凝土桥梁技术参数选择、混凝土桥梁配筋的探地雷达检测技术、混凝土桥梁内部缺陷的探地雷达检测技术、探地雷达图像的识别与三维重构、工程应用。

本书可作为桥梁检测技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

探地雷达技术在混凝土桥梁无损检测中的应用 / 谢峻等著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.12

ISBN 978-7-114-14321-2

I. ①探… II. ①谢… III. ①探地雷达—应用—钢筋混凝土桥—无损检验—研究 IV. ①U448.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 274172 号

“十三五”国家重点图书出版规划项目

交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

书 名: 探地雷达技术在混凝土桥梁无损检测中的应用

著 作 者: 谢 峻 高小妮 郑晓华 何小钰

责任编辑: 周 宇 王景景

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 9

字 数: 209 千

版 次: 2018 年 3 月 第 1 版

印 次: 2018 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14321-2

定 价: 60.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾 问：陈 健 周 伟 成 平 姜明宝

主 任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委 员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王 炜 孙立军 蒋树屏 韩 敏 张喜刚

吴 澎 刘怀汉 汪双杰 廖朝华 金 凌

李爱民 曹 迪 田俊峰 苏权科 严云福

总序

General Preface

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版《交通运输建设科技丛书》,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支

持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版《交通运输科技丛书》,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!

杨伟光

2016年6月24日

前言

Foreword

随着经济的高速发展,我国交通基础设施建设近年来也突飞猛进。截至2016年,我国桥梁总数已超过100万座,其中公路桥梁总数接近80万座。在已建桥梁中多数桥梁为混凝土桥梁,由于设计、施工、运营等因素以及混凝土本身的材料性质,在建造和使用过程中,不可避免地会在结构内部存在或产生病害和缺损,包括保护层厚度不足、混凝土裂缝、空洞、离析、钢筋分布不符合设计、预应力位置偏差及灌浆不饱满等。混凝土内部缺陷随着桥梁投入运营,严重程度随时间和环境不断增长,对桥梁的长期安全性和耐久性有巨大威胁。但是,目前对桥梁内部缺损的检测手段很有限,多数桥梁检测仍然基于表观检测和人员经验,费时费力,效率低下。探地雷达(GPR)法是一种依靠高频电磁波在不同介质中传播以获取介质特征信息的无损探测方法,是近年来出现的新型无损检测方法,具有快速、分辨率高、结果直观等优点,可确定混凝土内部缺陷的分布、形状和走向,适用于混凝土结构内部状况检测应用。

本书是一本针对实际工程而著的工程应用类书籍。对探地雷达检测混凝土桥梁所需基础理论与检测参数选择的介绍注重和实际的结合;对探地雷达对表层钢筋干扰下混凝土桥梁深层钢筋的定位及内部缺陷检测的研究,以模型试验、实桥检测研究为主;对采用探地雷达进行混凝土桥梁内部缺陷检测过程中各影响因素排除及提高识别精度的方法进行了较为全面和详细的研究;给出了基于探地雷达图像自动识别与识别结果三维重构的理论与实现方法,其成果对探地雷达检测混凝土桥梁内部缺损的应用技术推广具有较强的实用价值。本书是探地雷达检测技术研究成果和相关工程实践经验的集中体现,内容实用性较强,可供相关检测技术人员参考。

本书第1章的编写由郑晓华、安宁完成,第2章的编写由谢峻、潘宝林完成,第3章、第4章、第5章的编写由谢峻、高小妮完成,第6章的编写由谢峻、何小钰完

成,第7章及附录的编写由郑晓华、周毅姝、曾丁完成。

本书是作者大量试验研究与实桥应用经验的总结提炼,主要成果来源于交通运输部交通科技项目《服役混凝土桥梁内部缺损无损可视化检测技术及装备研发》,同时也吸收消化了国内外的同类研究成果,限于篇幅或者编者疏漏,有些参考资料未能一一注明出处,在此一并感谢。在编写过程中,同行给予了很多支持和帮助,并提出了很多宝贵的建议,作者对此表示衷心感谢。在本书的编写中张科超副研究员等为本书的编写也做出了贡献,在此一并向他们表示感谢。感谢作者单位交通运输部公路科学研究院及北京公科固桥技术有限公司的大力支持。

由于作者经验及水平有限,书中难免存在一些错误且有欠缺之处,诚望读者批评指正。

作者

2017年9月

目 录

Contents

第 1 章 探地雷达技术在混凝土结构检测中的应用现状	1
1.1 探地雷达技术的简要发展历程	1
1.2 探地雷达主要类型与特点	3
1.3 探地雷达的应用	4
第 2 章 探地雷达检测混凝土桥梁基础知识	7
2.1 电磁学基本原理	7
2.2 正演模拟分析方法	11
2.3 探地雷达检测钢筋混凝土结构的基本方法	11
2.4 混凝土桥梁内部配筋(束)与缺损现状调查	12
第 3 章 探地雷达检测混凝土桥梁技术参数选择	25
3.1 探地雷达主要技术参数	25
3.2 混凝土桥梁雷达检测参数选择	31
3.3 探地雷达检测混凝土桥梁多维成像的测线布设研究	37
3.4 探地雷达检测混凝土桥梁波速标定	39
3.5 探地雷达检测混凝土桥梁直达波的截取方法	40
第 4 章 混凝土桥梁配筋的探地雷达检测技术	46
4.1 探地雷达天线方向对钢筋定位的影响研究	46
4.2 钢筋定位的雷达道间距选择	48
4.3 表层钢筋对深层配筋识别的影响研究	52
4.4 天线阵雷达混凝土桥内部配筋定位检测技术研究	75
第 5 章 混凝土桥梁内部缺陷的探地雷达检测技术	83
5.1 混凝土桥梁典型内部缺陷的雷达图像特征	83
5.2 波纹管道灌浆饱满度雷达识别方法	88
5.3 混凝土内部缺陷的无损联合检测技术	95
第 6 章 探地雷达图像的识别与三维重构	98
6.1 图像预处理	98

6.2 图像分割 110

6.3 特征提取 111

6.4 基于机器学习的图像识别 113

6.5 三维可视化的软件实现 116

第7章 工程应用..... 120

7.1 预应力混凝土箱梁桥普通钢筋定位检测 120

7.2 预应力混凝土箱梁桥预应力钢束定位检测 121

7.3 混凝土斜拉桥钢筋定位检测 124

7.4 桥面板混凝土铺装脱空检测 127

附录 国内外常用商业雷达技术性能比较表..... 129

参考文献..... 130

第1章 探地雷达技术在混凝土结构检测中的应用现状

1.1 探地雷达技术的简要发展历程

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是一种特殊类别的超宽带(UWB)雷达,利用不同介质电磁参数的差异性,发射高频电磁波在不同介质中传播,并通过获取回波的传播时间、振幅、波形和频率等来分析和推断介质特征信息,如实现地表埋置物或混凝土结构物中钢筋、空洞或公路路面结构分层面的精确定位等^[1-5]。GPR检测技术是一种无损检测技术,具有穿透能力强、探测深度大、可实现非接触式探测、速度快、分辨率较高、可确定内部物体(或缺陷)的形状和走向、无污染和无辐射等优点。现代用于混凝土结构的GPR的常用中心频率大致在500MHz~2GHz,探测深度约达1m,对于绝大多数的混凝土构件检测已经足够。

GPR技术的发展大致可以分成三个阶段,即发明阶段、发展阶段和成熟阶段。

19世纪60年代到20世纪30年代为第一阶段,即探地雷达技术的发明阶段。1864年,James Clerk Maxwell创立了电磁波传播的基本理论。1888年,Heinrich Hertz证明了电磁波的聚焦、直进、反射、折射和偏振现象,为雷达的出现奠定了理论基础。1904年,Christian Hülsmeyer发明电动镜(Telemobiloscope),首次尝试用电磁波信号来探测远距离的金属体。1910年,德国人Leimbach和Löwy取得了定位地下埋设物的专利。1926年,Hülsmeyer成为首位采用脉冲技术探测埋设物的人,他提出无论是否具有导电性,介电常数的变化都将导致电磁波产生反射,早期探地雷达技术的雏形基本建立。

20世纪40年代到60年代为第二阶段,即探地雷达技术的发展阶段,主要为脉冲技术的发展。研究主要集中于冰雪层的探测领域,同时扩展到探测煤矿、盐矿、石油天然气管道和考古的探测。

20世纪70年代至今为第三阶段,即探地雷达技术的成熟阶段。探地雷达技术的应用领域得到极大扩展,其中1990—2000年是探地雷达技术发展的一个高潮期,计算机技术的进步推动了全三维数字模拟^[6],全极化探地雷达系统^[7]和GPS一体化的探地雷达系统^[8]开始出现,图像处理和解释技术也获得了极大发展,探地雷达技术进入全盛期。

1.1.1 商用GPR的发展

20世纪80年代开始,数字商用探地雷达系统开始陆续出现,其中有代表性的有美国Geophysical Survey Systems公司(GSSI)的SIR系列雷达、加拿大Sensors & Software公司(SSS)的Pulse EKKO系列雷达、意大利IDS公司的RIS系列雷达、瑞典MALA公司的RAMAC/GPR系列雷达,以及日本应用地质株式会社(OYO)的GEORADAR系列雷达等。

我国对探地雷达的研究起步相对较晚。1990 年左右探地雷达才进入中国,起初我国实际中使用的探地雷达大多是从国外引进的,如国内多家单位从日本 JRC 公司引进了 JEJ-60BF 雷达仪,用于探测钢筋混凝土结构内部钢筋分布和缺陷的检测等。随着应用的深入,我国也逐步开始了探地雷达系统的开发和研究,原电子部 22 所^[9]、原航天部爱迪尔公司^[10]、骄鹏公司与矿业大学先后开始数字化雷达的研制,分别推出了各种频率的探地雷达系统,如 LT-1(A) 探地雷达、GEOPEN、CBS-9000 系列探地雷达等。位于青岛的中国电子科技集团公司第 22 研究所(中国电波传播研究所,原电子部 22 所)研制的 LTD-2100/2200 便携式探地雷达是国产商业雷达的典型代表,其性能和可靠性已与国外主流雷达相当,可用于军事、地质、交通、水利及考古等部门,其用户已达 100 多家。其新产品 LTD-90 生命搜救雷达在汶川地震的生命信息搜救中得到应用^[11],便携式雷达成像探测仪也在鸟巢安保探测中得到应用。基于雷达体制的 LTD-80 工程检测仪将成为电磁感应原理钢筋检测仪的升级产品,也已成功地应用于多种工程结构的缺陷及异物的检测中。

国内外现代探地雷达的基本原理大同小异,主要功能都有多通道采集、多维显示、实时处理、变频天线、多次叠加、多波形处理等。

1.1.2 商用 GPR 的数据处理技术概况

在商用 GPR 出现以后,数据处理能力成为制约 GPR 发展水平、限制 GPR 应用范围的关键因素,一方面雷达扫描的数据量相当大,另一方面雷达接收到的电磁信号是合成波,包含的信息很丰富,不经过处理几乎无法判读出有用信息。对 GPR 数据作深入处理,可分为两大部分,第 1 部分为通用信号处理技术,第 2 部分为特殊处理技术。通用信号处理技术包括数据编辑整理、时变增益校正、时间和空间滤波,核心在于杂波抑制和滤波,凸显有效信息。特殊处理目前主要采用图像处理法和逆散射法。

图像处理法主要对时域雷达图进行数学和图形处理,实现目标识别。图像法最初借鉴了比较成熟的地震数据处理方法,如偏移^[12]、反褶积^[13]等,近年来 Hough 变换^[14]、合成孔径成像^[15]、全息成像^[16]、高分辨率三维图像处理^[17]、自适应图像法^[18]等也开始应用于 GPR 数据的实时处理或后处理。与数字信号技术相结合,人工智能技术的发展为利用计算机模拟人类理解与感知过程,以识别各种不同模式的目标和对象提供了技术途径。近年来,国内一些专家学者及单位都相继开展了一些利用人工智能解释探地雷达混凝土检测结果的研究和应用。汕头大学的谢慧才、徐茂辉等人提出了混凝土中钢筋直径雷达检测的神经网络模型^[19];同济大学的张鸿飞、程效军等人进行了隧道衬砌空洞的探地雷达图谱特征研究^[20];云南航天物探检测股份有限公司开发了雷达的人工智能反演识别软件^[21]。图像识别技术是人工智能的一个重要领域,它是利用计算机模拟人类理解与感知过程,以识别各种不同模式的目标和对象的技术。图像识别的发展经历了三个阶段:文字识别、数字图像处理与识别、物体识别。文字识别的研究是从 1950 年开始的,一般是识别字母、数字和符号,从印刷文字识别到手写文字识别,应用非常广泛,并且已经研制了许多专用设备,汉王科技是文字识别技术的成功引领者;数字图像处理与识别的研究开始于 1965 年,数字图像与模拟图像相比具有存储传输方便、可压缩、传输过程中不易失真、处理方便等优势,这些都为图像识别技术的发展提供了强大的动力;物体识别主要是指对三维世界的客体及环境的感知和认识,属于高级的计算机视觉范畴,它是以

数字图像处理与识别为基础的,结合人工智能、系统学等学科的研究方向,其研究成果被广泛应用于各种工业及探测机器人。图像分割是图像识别中图像处理的一项关键技术。自20世纪70年代,其研究已经有几十年的历史,一直都受到人们的高度重视,至今借助于各种理论提出了数以千计的分割算法,而且这方面的研究仍然在积极地进行着。现有的图像分割方法有许多种,包括阈值分割方法、边缘检测方法、区域提取方法、结合特定理论工具的分割方法等。从图像的类型来分,图像分割包括灰度图像分割、彩色图像分割和纹理图像分割等。早在1965年就有人提出了检测边缘算子,使得边缘检测产生了不少经典算法。在近20年间,随着基于直方图和小波变换的图像分割方法的研究计算技术、VLSI技术的迅速发展,有关图像处理方面的研究取得了很大的进展。图像分割方法结合了一些特定理论、方法和工具,如基于数学形态学的图像分割^[22]、基于小波变换的分割^[23]、基于遗传算法的分割^[24]等。

逆散射法从电磁波的标量或矢量方程出发,根据GPR接收的信号反演目标及其背景的电磁本构参数、目标的几何参数(尺寸、深度和方位角等),在定量无损评估(QNDE)等方面得到了有效应用^[25]。

除探地雷达采集软件外,配套的数据处理软件,可采用通用的雷达分析软件Reflexw,基本兼容各主流探地雷达的数据文件的格式。同时也可使用各雷达厂商自己的探地雷达信号采集及处理软件。例如:美国GSSI公司配备的专用的雷达数据后处理软件Radar,用户可根据自身需要选择具有特殊功能的软件模块;意大利IDS公司的GresWin2后处理软件提供基本的信号处理与滤波功能,GRED软件提供了更进一步的信号处理功能,并配备了GRED 3D、GRED 3D CAD、GRED 3D UTILITIES模块分别提供不同深度的识别与图形绘制功能;瑞典MALA公司的Groundvision2也提供了从三维雷达数据采集、解释到出报告无缝链接的软件包。

1.2 探地雷达主要类型与特点

从探地类仪器的原理来进行划分,探地雷达的仪器系统主要可以分为时域和频域探地雷达系统。

1.2.1 时域探地雷达系统

时域探地雷达系统以脉冲探地雷达为主,采用冲激脉冲体制^[26-29]。雷达向外发射一个时域脉冲,并接收随时间变化的反射波能量。反射波的形式描述了地下目标体的散射能量随时间的变化特征。距离信息是基于波的双程时长计算得到的。该体制的GPR系统将时域脉冲信号传递给天线,依靠天线向外辐射电磁波,因此中心频率成为影响冲激体制GPR系统动态范围的关键因素。

基于冲激脉冲技术的GPR,回波数据的记录和显示方式在不断发展。现代冲激脉冲体制GPR系统采用了数字技术。商用冲激脉冲体制GPR运用重复采样法或等效采样的方法,对每个发射脉冲对应的回波信号进行单点采样,重复多次发射脉冲,各次的采样点以相等的时延间隔后移。

1.2.2 频域探地雷达系统

频域探地雷达主要有两种:调频载波(FMCW)雷达和步进频率载波(SFCW)雷达。

(1) FMCW 雷达

FMCW 雷达在所选择的频率范围内反复发射连续变化的频率并采集频域回波数据^[30]。即发射信号的频率“扫过”一段固定的频率区间,获取的反射波能量是频率的函数,表征了地下目标体散射能量随频率的变化情况。接收到回波信号与发射信号进行混频或外差处理,并在扫频期间进行数字采样。在整个扫频期间采集的数据再转化到时域中,形成合成脉冲。FMCW 雷达的优点在于简单的系统设计与较低的费用;缺点在于其调频系统可能会受到频率模糊问题的影响而导致系统性能的下降。

(2) SFCW 雷达

与 FMCW 雷达不同的是:SFCW 雷达的发射信号频率在一个固定的频率区间线性阶跃递增^[31],接收信号在每一离散的频率点上进行混频和采样,数字波形同样转换到时域中形成合成脉冲。

SFCW 雷达的主要优点包括:可控的发射频率、能量的有效利用以及运用低速 ADC 对宽带信号的有效采样。SFCW 雷达的缺点是不能对回波信号进行时变增益处理。当将频域数据转换到时域时,将会引入旁瓣干扰问题,强回波信号的旁瓣可能会掩盖弱散射体的回波信号。

1.2.3 时域探地雷达和频域探地雷达的比较

两种雷达的物理含义实际是一样的,只是信号的表现形式和测量方式不同。在目标的探测中,探测的深度都要受电磁波的能量控制,分辨率都受电磁波信号的带宽制约。比较这两类探地雷达,时域探地雷达优点在于硬件实现简单、体积小、重量轻、平均功率小、一次测量涵盖的频域范围较宽、测量的结果是时间域波形、结果直观、抗干扰能力较强;其缺点在于存在信号振铃、发射功率的不充分利用(低占空比)、受限于脉冲宽度的分辨率等。频域探地雷达主要的优势是较宽的动态范围、较低的噪声系数及较高的平均发射功率、分辨率和准确性较好,但其硬件系统和信号采集与处理复杂,体积和重量、功耗较大,频率信号在转换成时域信号时存在旁瓣干扰,不利于对地下深层目标及位于不同深度的多目标的探测。总体上时域雷达的应用更为广泛,技术发展也更快。目前主要的商业雷达均为时域雷达。

1.3 探地雷达的应用

探地雷达检测混凝土结构技术是在不破坏混凝土内部结构和使用性能的情况下对其内部缺陷、几何形状、组织结构等进行测定和评价的一项综合性应用技术。电磁学、电子工程、地球物理、数学和计算机等学科的发展推动着 GPR 技术不断前进,工程检测领域的需求则引领了探地雷达技术发展方向。探地雷达因为其具有高效、快速、无损的特性在混凝土结构中的应用范围和领域逐渐扩大,如铁路、公路、市政工程等均已普遍采用探地雷达进行检测^[32-37]。探地雷达技术无论是在仪器设备还是数据处理软件的技术水平方面均得到较大提高,正越来越广泛地应用于混凝土结构检测中。通过探地雷达可对混凝土内部缺损包括混凝土不密实区和空洞、洞内充水、预应力孔道注浆不密实、混凝土结合面质量不良、均质性欠缺等进行判断,还可检测配筋的状态,对路面层厚度的检测可有效地解决检测的精度和各结构层界面的分辨问题。

目前在探地雷达检测方面已较为成熟的项目包括:钢筋位置^[38]、混凝土均匀与密实性^[39]、衬砌厚度^[40]、脱空和空洞^[41]、渗漏带^[42]、回填欠实^[43]、围岩扰动^[44]等。一些相关研究包括 Park S K 提到日本的东京大学在实验室做了关于钢筋网定位和空洞形状探测的试验研究^[45,46]:在沙中埋设一个尺寸为 40cm × 40cm × 10cm 的空洞,在沙的上方加一块 20cm 厚的钢筋混凝土板,然后使用雷达法沿钢筋混凝土板表面对其进行扫描。这一研究主要是基于雷达无损检测技术应用能力的探索。2004 年,Conner 用 1.5GHz 天线成功检测出塑料波纹管内的注浆空洞^[47]。2008 年,David G. Pollock 也指出用地质雷达可以检测到塑料波纹管内的空洞^[48]。1997 年起,美国材料试验协会先后开始了土木工程用 GPR 雷达检测标准的制定和实施,标志着 GPR 技术的某些应用完全成熟。这些标准的最新版本包括《Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar》(ASTM D6087—2008),用于指导应用 GPR 进行具有沥青面层混凝土桥面的检测;《Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar》(ASTM D4748—2010),为用脉冲探地雷达测量路面结构层厚度的标准;《Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation》(ASTM D6432—2011),适用于脉冲探地雷达探测地下结构或地下材料的所有工程项目。国内在检测标准规范方面,公路行业的检测规程或指南尚未推出,但铁路行业标准和一些地方规程已经出现,如《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》(TB 10223—2004)、江苏省工程建设规程《雷达法检测建设工程质量技术规程》(DGJ32/T J79—2009)等。工民建领域国标《雷达法检测混凝土结构技术规程》也正在编写中。

探地雷达的有些应用还只是具有可能性或一定识别概率,其完善还有待于理论、硬件与软件能力的进一步提高,如钢筋直径的确定、钢筋锈蚀的定位及量化等。相关的一些研究包括:

(1) J. H. Bungey^[49,50]、叶爱文^[51]都提出用神经网络进行钢筋直径识别的方法。叶爱文分别利用 BP 和 Elman 两种神经网络对钢筋混凝土中钢筋直径进行测算,并针对神经网络应用时实际训练数据不足的问题,提出了利用多项式拟合的方法来补充训练数据。J. H. Bungey、叶爱文的研究结果表明,神经网络都能够对钢筋直径进行估计。

(2) 徐茂辉等人采用在 AutoCAD 软件中导入雷达原始图像的方法进行直径的粗略估计^[52]。得出了钢筋直径越大时,该方法估计误差越小;直径越小时,误差越大的结论。

(3) 张维平、肖向东等人建立了钢筋直径的计算模型,并采用 GR-1 型雷达对钢筋直径公式进行标定及计算,为获得不同雷达系统检测钢筋直径的准确数据,消除因雷达辐射波形式不同造成的计算误差,需要对使用设备进行标定^[53]。

总体上,采用探地雷达对钢筋直径的识别研究较少,利用雷达反射波形或图像难以直接准确获取钢筋直径,同时混凝土的离散性比较大,且对检测结果的影响因素也比较多,因此还需要对其进行更深入的研究。

J. H. Bungey、Maierhofer 等人都对混凝土结构用雷达的应用领域进行了总结和展望^[1],综合起来包括:

- (1) 确定主要的施工特征。
- (2) 评估梁板构件厚度(含分层厚度)。
- (3) 定位钢筋/预应力筋及金属管道。

(4)定位潮湿区(含水区)。

(5)定位空洞/蜂窝/裂缝。

(6)定位氯化物。

(7)确定钢筋直径。

(8)确定空洞尺寸。

(9)估计氯盐浓度。

(10)定位钢筋锈蚀。

其中(1)~(5)项具有较高的探测可靠度,其结果误差在工程可接受的范围内(厘米级)。前4项具有最高的结果可靠度水平,从第5项起可靠度逐步降低,对钢筋锈蚀的定位的可靠度最差。从(1)~(10)显示了对探地雷达检测原理(电磁特性)及概念认知深度的由深到浅。潜力巨大的探地雷达检测技术仍在发展中,检测项目复杂程度和高精度要求不断向 GPR 提出新的挑战,日趋广泛的隐蔽工程探测活动将推动相关学科的进步,继而促进 GPR 硬件系统的发展和数据处理技术的不断创新。

第2章 探地雷达检测混凝土桥梁基础知识

2.1 电磁学基本原理

电磁波及其传播理论是雷达技术应用的理论基础。电磁波是交变电场与磁场相互激发在空间传播的波动。描述电磁波传播特性的波矢量 k 为: $k = \beta + i\alpha$ 。 β 描述波传播的相位,称为相位常数,其物理含义是波传播路径中每单位长度上的相位弧度数; α 描述波幅的衰减,称为衰减常数。物体中存在着自由电荷与束缚电荷,含自由电荷的物体称为导体或导电介质,不含自由电荷的物体称为电介质。当电介质被放入外电场中时,其内部的束缚电荷在外电场作用下在一定范围内发生运动,束缚电荷的分布发生变化,这种现象称电介质的极化,体现介质的特性。相位常数、衰减常数与介质电磁特性参数及频率的关系见式(2.1-1)及式(2.1-2):

$$\beta = \omega(\mu\varepsilon)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{(1 + \sigma^2/\omega^2\varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} + 1}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1-1)$$

$$\alpha = \omega(\mu\varepsilon)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{(1 + \sigma^2/\omega^2\varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} - 1}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1-2)$$

式中: μ ——磁导率;

ε ——介电常数;

ω ——圆频率;

σ ——电导率。

磁导率是一个无量纲物理量,它表征介质在磁场作用下产生磁感应能力的强弱。绝大多数工程介质是非铁磁性物质,磁导率都接近1,对电磁波传播特性无重要影响。纯铁、硅钢、坡莫合金、铁氧体等材料为铁磁性物质,其磁导率很高,达到 $10^2 \sim 10^4$ 。电磁波在这些物质中传播时波速和衰减都受到严重影响。

介电常数是一个无量纲物理量,它表征一种物质在外加电场情况下,储存极化电荷的能力,也称电容率。电介质中水的介电常数(数值为81)最大,最小的是空气,数值为1。金属的介电常数是外场频率的函数,是一种色散介质。邝向军^[54]的研究指出,金属的极化主要来自于电子的位移极化。在低频极限下,金属的相对介电常数将趋于无穷大,表明金属对电磁波的吸收;在高频极限下,金属不再是导体而是电介质了,甚至可以像绝缘体一样反射和透射电磁波,不产生焦耳热。

电导率(电阻率的倒数)是表征介质导电能力的参数,单位为 S/m。它对于电磁波的传播有重要影响。因为有一定的电导率存在,电磁波在工程介质中传播时,在电磁场的作用下会产生传导电流,发热做功,造成电磁波能的损耗。因而在工程介质中电磁波传播的距离是有限