



铁路车载探地雷达 路基检测技术

管月稳◎编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

铁路车载探地雷达路基检测技术

昝月稳 编著

中国铁道出版社

2017年·北京

内 容 简 介

本书共分13章,介绍车载探地雷达检测路基病害的基本原理;铁路车载探地雷达的技术条件;探地雷达路基检测各系统包括探地雷达子系统、定位子系统、路面图像采集子系统、雷达数据自动采集子系统等;铁路车载探地雷达系统的检定方法;探地雷达数据处理方法的数学基础;探地雷达图像识别的基础知识;铁路路基病害雷达检测数值模拟;铁路路基病害雷达检测现场模拟试验;铁路车载探地雷达的数据处理及其资料解释;铁路车载探地雷达路基检测技术的应用,以及高速铁路无砟轨道结构和路基检测的研究。

本书可供铁路工务技术、管理人员学习使用,也可作为大学、研究生专业教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

铁路车载探地雷达路基检测技术/咎月稳编著. —北京:中国铁道出版社,2017. 8

ISBN 978-7-113-21727-3

I. ①铁… II. 咎… III. ①车载雷达-探地雷达-应用-铁路路基-检测 IV. ①U213. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 088106 号

书 名:铁路车载探地雷达路基检测技术
作 者:咎月稳 编著

策 划:时 博
责任编辑:时 博 编辑部电话:010-51873141 电子信箱:crph@163.com
封面设计:崔丽芳
责任校对:焦桂荣
责任印制:高春晓

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

版 次:2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:17.75 字数:387千

书 号:ISBN 978-7-113-21727-3

定 价:80.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

铁路路基在运营过程中,由于自然作用和其他因素影响会产生路基病害,因此路基状态需要定期检查。既有线路基病害调查目前大多采用人工勘探方法,效率低、费用高、不安全,无法实现全路路基病害的普查。新建线路路基工程质量检测也主要靠人工方法,劳动强度大、时间长、影响工期。铁路车载探地雷达系统检测路基具有很大的优势:全断面连续检测使得效率大大提高;速度快,能够实现既有线路基病害普查,新建线路路基也能在很短时间内完成全线检测。未来的几十年内,铁路将快速发展,铁路车载探地雷达路基检测技术对确保铁路运输安全有着重大意义,在铁路路基维护、科学管理方面将会发挥重要的作用。

我从2002年开始研究铁路车载探地雷达系统和检测技术,先后承担过原铁道部三个有关铁路车载探地雷达方面的科技研究课题,研制出第一代、第二代和第三代铁路车载探地雷达系统。2006年研制出我国第一台铁路提速区段路基状态检查车,即第一代铁路车载探地雷达系统,该系统有三个相互独立的通道,检测速度为45 km/h。2008年研制出多通道高速扫描探地雷达系统以及数据采集软件和数据处理软件,即第二代铁路车载探地雷达系统,该系统仍为三个相互独立的通道,测试速度最高可达175 km/h。2013年研制出铁路隧道衬砌检测车载探地雷达系统,即第三代铁路车载探地雷达系统,该系统具有六组天线,安装在客车连接体外中上部,天线底面不超过机车车辆界限,检测速度为80~175 km/h,荣获国际隧道与地下空间协会(ITA)2015年“年度技术创新奖”。

探地雷达检测结果是探地雷达图像。与医学X片和超声波图像需要有经验的专业人员识别图像一样,车载探地雷达采集的巨量数据所形成的大量图像也需要大量的专业人员从事判图工作。经过十多年的研究,我积累了一些车载探地雷达检测路基方面的判图经验,本书的目的就是为专业人员提供这方面的参考。

本书主要介绍第一代和第二代车载探地雷达系统和检测技术。

本书共分13章,介绍车载探地雷达检测路基病害的基本原理;铁路车载探地雷达的技术条件;探地雷达路基检测各系统包括探地雷达子系统、定位子系统、路面图像采集子系统、雷达数据自动采集子系统等;铁路车载探地雷达系统的检定方法;探地雷达数据处理方法的数学基础;探地雷达图像识别的基础知识;铁路路基病害雷达检测数值模拟;铁路路基病害雷达检测现场模拟试验;铁路车载探地雷达的数据处理及其资料解释;铁路车载探地雷达路基检测技术的应用,以及高速铁路无砟轨道结构和路基检测的研究。

本书大部分内容是课题组的研究成果和我与西安交通大学章锡元教授、廖红建教授、张安学教授指导研究生取得的成果。我们的研究工作主要是铁路车载探地雷达系统和现场试验,侧重于技术的研究。为了使读者能够了解国内外这方面的最新研究成果和探地雷达的原理,引用了一部分国内外公开发表的文献和探地雷达方面书籍的部分内容。由于商业技术保密的原因,本书探地雷达系统方面的电路图都是一般的原理图和示意图,请读者给予理解。

我与西安交通大学章锡元教授、汪文秉教授、张安学教授合作十多年,章锡元教授、张安学教授、咎碧磊工程师分别在车载探地雷达系统的硬件和软件方面做出了重要贡献。西安交通大学汪文秉教授给了我很大的鼓励和帮助。我原来的工作单位西安铁路局科学技术研究所提供了必要的研究条件,徐智远助工、魏文涛工程师长期与我一同试验。原铁道部科技司徐勇处长、张志方处长对我们的研究给予具体的指导和帮助。中国铁道出版社时博副编审为本书的编排和校核付出了大量的心血。在此,对他们的辛勤付出表示衷心的感谢!

本书在编写过程中得到西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室、教育部轨道交通安全协同创新中心(2011项目)的支持,一并表示感谢。

由于作者工作环境所限,本书若有不当之处,敬请各位专家及广大读者批评指正,候机修订。

咎月稳

2017年6月

目 录

0 绪 论	1
0.1 铁路车载探地雷达的基本概念	1
0.2 车载探地雷达检测铁路路基历程	2
0.3 车载探地雷达检测铁路道床路基的研究及应用现状	5
0.4 铁路车载探地雷达检测路基的特点和意义	6
0.5 铁路车载探地雷达检测路基的应用前景	7
参考文献	8
1 探地雷达原理	13
1.1 探地雷达探地原理	13
1.2 均匀介质中电磁波的传播特性	13
1.3 电磁波在两种不同介质界面上的传播特性	17
1.4 探地雷达的最大探测深度	19
1.5 探地雷达的分辨率	21
参考文献	26
2 探地雷达检测路基病害的基本原理	27
2.1 我国铁路标准道床与基床的基本结构	27
2.2 道床的电磁波传播参数	28
2.3 路基土的电磁波传播参数	32
2.4 道床和路基各层介电常数测试方法	36
参考文献	38
3 铁路车载探地雷达的应用条件和技术参数	39
3.1 我国铁路对车载探地雷达的要求	39
3.2 我国路基病害的类型及分布	39
3.3 铁路车载探地雷达的探测范围	45
3.4 铁路车载探地雷达天线的选择	45
3.5 铁路车载探地雷达的采集密度	46
3.6 铁路车载探地雷达的测量参数	47

参考文献	48
4 铁路车载探地雷达天线	49
4.1 天线的辐射特性	50
4.2 探地雷达的天线类型	56
4.3 地面耦合蝴蝶形状天线	58
4.4 空气耦合喇叭形状天线	59
4.5 探地雷达天线组合形式	60
4.6 车载探地雷达的天线极化方向	64
4.7 车载探地雷达的天线高度	66
4.8 车载探地雷达的天线能量锥	67
参考文献	68
5 探地雷达路基检测系统及数据自动采集方法	70
5.1 铁路路基状态检查车简介	70
5.2 铁路车载探地雷达路基检测系统的组成	73
5.3 CRGPR-MHS 型多通道高速扫描探地雷达系统	75
5.4 铁路车载探地雷达天线的安装	84
5.5 铁路车载探地雷达路基检测系统的定位系统	87
5.6 路面图像采集系统	89
5.7 数据自动采集方法	90
5.8 车载探地雷达系统的检定	91
参考文献	98
6 探地雷达数据处理方法的数学基础	100
6.1 探地雷达数据处理方法概述	100
6.2 常规的处理方法	101
6.3 属性处理——道特征分析	114
6.4 偏移处理	115
6.5 预测反褶积	118
参考文献	119
7 探地雷达图像识别基础	120
7.1 探地雷达图像的极性	120
7.2 探地雷达图像的极性颜色	123
7.3 探地雷达图像的比例	125
7.4 探地雷达图像上层位的识别表示	126

7.5 探地雷达图像上点目标的识别	126
7.6 探地雷达图像上时间零点的确定	128
7.7 探地雷达图像上的层位拾取	129
参考文献	131
8 铁路路基病害雷达检测数值模拟	132
8.1 电磁场数值计算的时域有限差分法	133
8.2 GprMax2D 软件概况	144
8.3 层状介质模型的模拟	145
8.4 矩形目标模型的模拟	151
8.5 槽状模型的模拟	152
8.6 梯形状道砟槽模拟	154
8.7 圆形目标模型的模拟	156
参考文献	161
9 铁路路基病害雷达检测现场模拟试验	162
9.1 现场模拟试验场地概况	162
9.2 现场模型坑的设计与施工	162
9.3 现场模型的实际测试与结果分析	165
9.4 正演模拟验证	173
10 铁路道床脏污检测与评价	175
10.1 介电常数法	175
10.2 频谱分析	176
10.3 时频分析	178
10.4 散射法	179
10.5 反射强度法	187
10.6 微分和积分方法	187
参考文献	192
11 铁路车载探地雷达的数据处理及其资料解释	194
11.1 准备工作	194
11.2 数据处理	196
11.3 资料解释	197
11.4 资料统计	204
11.5 基于 GIS 的铁路路基 GPR 数据信息管理系统	205
参考文献	213

12 铁路车载探地雷达路基检测技术应用	214
12.1 既有铁路路基病害普查	214
12.2 时速 200 km 铁路路基质量检测	229
12.3 新建线路路基质量检测	232
12.4 既有铁路冻土路基检测	235
12.5 路基深层探测	243
12.6 整体道床病害检测技术	252
参考文献	255
13 高速铁路无砟轨道结构和路基检测研究	256
13.1 高速铁路无砟轨道结构的正演数值模拟	256
13.2 水泥乳化沥青砂浆厚度检测的研究	258
13.3 轨道板内损伤裂缝检测的模拟	265
13.4 高速铁路无砟轨道结构下路基病害检测的模拟	266
13.5 数值模拟数据的偏移处理	270
13.6 现场试验	271
参考文献	273

0 绪 论

0.1 铁路车载探地雷达的基本概念

探地雷达,或称透地雷达,英文名称 Ground Penetrating Radar,简称 GPR,其他的英文名称还有 Ground Probing Radar(地面探测雷达)、Subsurface Radar(地下雷达)、Georadar(地质雷达)等,最早称地质雷达。它是一种用于浅层勘探的物探方法,其特点是快速、无损、连续检测,并能直观显示下结构。

1929年至1930年,德国地球物理学家 W. Stern 第一次在奥地利利用雷达直接向地下探测冰河的厚度。1960年,John. C. Cook 设计了一个雷达结构,用来穿透地下并接收地下界面反射,这个雷达是单周脉冲 VHF 机载雷达,与现在商业销售的探地雷达相同,主要用于冰雪厚度测量。John. C. Cook 是第一个提出用雷达波探测地下介质的人,因此,认为 Cook 的工作是探地雷达的真正开始。1972年,Rex Morey 和 Art Drake 创建了地球物理测量系统公司(Geophysical Survey Systems Inc. GSSI),生产和销售 GPR 设备,使得 GPR 在地质勘探得到应用,出现了大量与 GPR 有关的出版物,取得了许多研究成果,在之后的 20 年,注册了 300 多项与 GPR 有关的专利。从此,GPR 设备步入商品化,为探地雷达的理论研究、科学试验和工程应用提供了物质基础。现在,探地雷达技术已广泛应用于多个领域,如地质勘探、考古、农业和林业土壤水分检测、管线和地雷探测、公路路面检测、混凝土结构和桥梁检测、隧道衬砌检测、铁路路基道床检测等。

探地雷达的种类很多,但最常用的是时间域脉冲式探地雷达。它利用一个天线发射短脉冲电磁波,另一天线接收来自地下介质界面的反射波(回波),根据接收到波的旅行时间(双程走时)、幅度与波形,推断介质的结构。探地雷达的发射天线与接收天线之间距离很小,反射波的路径几乎垂直地面,在测线不同位置上,法线反射时间的变化就反映了地下地层的构造形态。

车载式探地雷达系统是将探地雷达系统安装在汽车或火车上,测试速度高,数据采集效率大幅度提高。第一台车载式公路探测探地雷达系统是 1985 年在美国联邦公路管理局的支持下研发出来的。20 世纪早期是公路车载探地雷达系统和探测技术研究的重要时期,到了 20 世纪中期和晚期,公路车载探地雷达系统路面、桥梁检测开始推广应用。21 世纪以来,随着计算机和电子技术的迅速发展,车载探地雷达系统和检测技术越来越成熟和普及。与一般地质勘探相比,车载式探地雷达系统要求扫描速度高,天线要离开地面一定的距离,要有较高的测距精度,根据用途可分为道路路面车载式探地雷达系统和铁路车载式探地雷达系统。国外车载探地雷达测试系统大致相同,由探地雷达系统、里程测试和 GPS 定位系统以及路面图像摄像系统组成。铁路车载式探地雷达系统多数为多通道探地

雷达系统。

与公路路面车载式探地雷达系统相比,铁路车载式探地雷达系统有很高的扫描速度,足以在每个轨枕间采集到信号;天线的几何尺寸和空间位置受机车车辆限界限制;混凝土轨枕对天线的电磁辐射有屏蔽影响;钢轨对天线的电磁辐射有强干扰作用;天线必须是屏蔽的,对低频天线屏蔽会使背景增强同时复杂化,从而使从地下返回的弱信号难以提取;距离测试较为复杂,通过车站时要经过不同的股道,会造成测距误差;测试过程受到严格控制,测试次数受到严格限制,否则会干扰铁路运输;测试结果的验证受到限制,因为在运营线路上,基于安全考虑和运输繁忙,不能随意开挖或钻探进行验证。

0.2 车载探地雷达检测铁路路基历程

车载探地雷达检测铁路路基经历了早期的试验阶段、装在各种小车上的应用测试阶段和高速车载探地雷达检测路基道床的应用阶段。车载探地雷达应用于铁路的研究,从检测木枕铁路的研究逐步转向检测混凝土轨枕铁路的研究;从人工拖拉天线检测方式的研究逐步转向车载方式的研究;从单通道雷达系统逐步转向多通道探地雷达系统;从低速(10 km/h)检测逐步转向高速(175 km/h)检测;从浅层探测逐步转向深层探测。探地雷达数据处理技术越来越完善,数据解释越来越定量。

0.2.1 探地雷达用于铁路路基道床检测的早期试验

最早探地雷达用于木枕铁路,木枕对电磁波没有屏蔽作用。后来将探地雷达用于混凝土轨枕铁路,但是混凝土轨枕对电磁波有屏蔽作用,电磁波无法到达轨枕下面的石砟层和路基,因而进行了大量的试验。经过试验,发现在混凝土轨枕上方电磁波确实被屏蔽,但在混凝土轨枕之间的砟槽内,电磁波可以穿透下去。在轨道上用探地雷达探测的地下界面不是连续线,而是断续线,类似于点划线。大量试验证实探地雷达可以用于混凝土轨枕线路。

20世纪70年代后期,国外开始讨论用地质雷达测试铁路路基。1979年,美国地球物理勘探公司(GSSI)用SIR-7型地质雷达调查了长度为66根枕木的一段旧工业铁路。地质雷达装载在公铁两用车上。公铁两用车拖动载有天线拖车,天线杆距地面高度9 cm,以5 km/h的速度在轨道上移动。SIR-7型地质雷达系统包括五个主要部分:雷达控制单元、阴极射线管荧光屏、电源、四轨迹磁带记录仪、插头式发送器,当时称这种设备为轨道雷达(Track Radar)。北美铁路认为轨道雷达测试速度太慢,然而这种轨道雷达在欧洲铁路被广泛接受,瑞典应用较多。

1984年6月至1985年上半年,GSSI公司又在另一条铁路线上进行试验。这次试验使用SIR-8型地质雷达,增加了微处理器,连续试验了5 632.704 m(3.5 mi)。所有的数据可以图形显示,同时被记录在磁带上。采集信息的时间需要1 h,因此对野外参数进行了调整。调整包括扫描速度、采样速率、天线高度和天线排列。为了得到满意的结果,试验采用不同的运行速度。

1988年,原郑州铁路局西安研究所和西安交通大学合作研究在混凝土轨枕线路上用探地雷达探测道砟囊。现场试验在一段废弃的线路上,挖出一个上顶面长度为10 m、下底面长度为4 m、深度为3 m的土坑,坑中填道砟,模拟道砟囊,如图0.1所示。研制的探地雷达系统放置在能够在轨道上行走的小车上,小车后面拖拉着一个载有收发天线的小车,天线的中心频率为300 MHz,测试深度可以达到3.0 m。为了行进均匀,小车由直流变速电动机驱动,行进速度为5 m/min。

探地雷达系统主要由主机、脉冲发生器、数字示波器、盒式录音机、发射天线和接收天线组成。当时的记录速度很慢,行走2 min,要将设备抬下道,记录8 min。可喜的是能够测出道砟囊的轮廓,在计算机上处理后得到的彩色图像如图0.2所示。

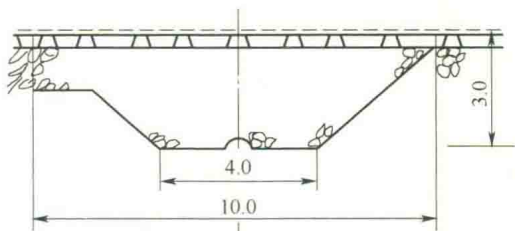


图 0.1 现场模拟道砟囊的断面(单位:m)



图 0.2 测试结果的伪彩色图像

0.2.2 装在小车上的探地雷达检测铁路路基道床试验

20世纪90年代后期以来,微型计算机技术迅猛发展,推动探地雷达更新换代,功能日趋增强。探地雷达的显示、记录等关键器件得到很大改善,使得探地雷达的性能能够满足铁路的快速测试。

对于短距离或临时性实验,将天线放在线路中心,在地上拖行,或者做成简单的小车。当用于较长距离的检测和长期用于线路检测时,将设备放在小车上推行,一方面提高了检测速度,另一方面降低了检测人员的劳动强度。英国以手推式为主,测试速度为1.5 km/h,累计测试了50 km的铁路。

手推式探地雷达检测路基早期主要用于探地雷达检测铁路路基的可行性研究。其设备轻便灵活,可以分段在维修天窗内进行路基检测,但效率低,不能用于整条线路路基检测。随着车载探地雷达的应用和从安全角度考虑,手推式探地雷达检测路基会受到限制,但会成为车载探地雷达检测的补充,在以下方面应用:

(1) 整条线路的局部一段临时出现路基病害时,使用手推式探地雷达在维修天窗内检测非常方便,对正常运输不会造成干扰。

(2) 每年一度的秋检和春检,路基检测与轨道检查同车进行,可以实现全路路基普查,但车载检查只能覆盖正线和部分车站线路,大部分站线仍需要手推式探地雷达检测。

(3) 车载探地雷达检测发现路基问题,如果需要进一步详查或验证,可以使用手推式探地雷达检测。由于手推式探地雷达定位准确,天线高度低,反射信号强,可以提高病害

位置、深度探测的准确率。

图 0.3 是作者与西安铁路局、西安交通大学研制的手推式探地雷达系统。



图 0.3 手推式双通道探地雷达系统

0.2.3 车载探地雷达检测铁路路基道床试验

进入 21 世纪,车载探地雷达检测铁路路基道床试验研究进入了一个新高潮。2002 年,美国联邦铁路(FRA)所做的铁路研究发展五年计划报告提出铁路探地雷达检测技术的研究。2004 年 1 月至 2008 年 1 月,欧盟 SAFE-RAIL 项目由意大利、德国、瑞典、英国和捷克等国专家组成研究组,研制创新铁路基础条件检测系统,包括快速地下雷达天线、高性能雷达控制单元、创新的铁路定位单元、创新的车载处理器、网络数据解释和处理软件。除欧盟 SAFE-RAIL 项目外,还有德国 GBM Wiebe 线路施工和养路机械公司 GeoRail 系统、意大利 IDS 等公司的铁路安全系统。

美国联邦铁路管理局研究项目第一阶段至第三阶段期间取得了许多重要成果,包括确定了数据采集的天线类型,确定了用于数据采集得天线结构,发展了初步数据处理方法,论证了车载探地雷达石砟状态评价的有效性。第三个阶段和第四阶段期间的成果有两项:美国 GSSI 公司研发了 2 GHz 喇叭天线和 500 MHz 空气耦合天线,以及道砟脏污度的评价方法。通过这四个阶段的研究,已经形成一套铁路车载探地雷达评价路基道床状态的技术。

0.2.4 高速车载探地雷达检测铁路路基道床的应用

车载探地雷达测试速度与探地雷达的扫描速率有关,而探地雷达系统的脉冲重复频率决定了探地雷达的扫描速率。目前,国外探地雷达脉冲重复频率较高的系统有美国 GSSI 公司 SIR-20 系列和意大利 IDS 公司 RIS-2K 系列的探地雷达系统。美国 GSSI 公司 SIR-20 系列探地雷达的脉冲重复频率为 500 kHz,有 2 个通道。意大利 IDS 公司 RIS-2K 系列探地雷达的脉冲重复频率为 400 kHz,有 4 个通道。但这两种系统都是分频的。SIR-20 系列探地雷达使用 1 个通道时,脉冲重复频率为 500 kHz,使用 2 个通道时,每个通道的脉冲重复频率为 250 kHz。RIS-2K 系列探地雷达的脉冲重复频率为 400 kHz,当同时使用 4 个通道时,每个通道的脉冲重复频率只有 100 kHz。SIR-20 系列探地雷达系统理论上总

扫描速率是 976 扫描线/秒,实际总扫描速率只有 570 扫描线/秒,同时使用 2 个通道时,每个通道的扫描速率是 285 扫描线/秒。RIS-2K 系列探地雷达系统理论上总扫描速率是 781 扫描线/秒,实际总扫描速率只有 490 扫描线/秒,同时使用 3 个通道时,每个通道的扫描速率是 163 扫描线/秒。

我国第一代铁路路基状态检查车由西安铁路局科研所和西安交通大学于 2002 年开始研制,测试速度为 45 km/h。研制的多通道探地雷达系统为独立三通道,每个通道脉冲重复频率为 130 kHz。2006 年开始研制第二代铁路路基状态检查车,测试速度为 120 km/h。经过大量现场测试,达到应用程度。西安铁路局科研所和西安交通大学研制的高速扫描多通道探地雷达系统为独立三通道,每个通道的脉冲重复频率为 500 kHz,扫描速度为 976 扫描线/秒,每个扫描线为 512 个点,测点间隔 5 cm 时检测速度为 175 km/h,测点间隔 10 cm 时检测速度为 350 km/h;研制的铁路专用探地雷达天线是空气耦合式短 TEM 喇叭天线,天线中心频率 300 MHz,检测深度 3 m,可满足我国既有铁路路基、新建铁路路基和高速铁路路基检测的需要。2006 年 8 月至 2010 年 12 月底,先后对胶济线、陇海线、太中银线、大准线等 10 条铁路路基进行了检测,折合单线检测里程达 4 920 km。铁路车载探地雷达系统可以与轨道检查同车检测,定期对全路路基进行普查,消除安全隐患。

俄罗斯 GEOTECH 公司的 OKO-2 多通道探地雷达系统,有 3 个喇叭形屏蔽天线,每个通道的记录速率为 200 扫描线/秒(每扫 512 个点),AB-400 型喇叭天线测深 3 m,深度分辨率不大于 10 cm。天线质量小于 35 kg,每米 6 个扫描线,速度为 120 km/h。该系统已检测了俄罗斯 3 000 km 铁路线。

2010 年,意大利 IDS 公司推出 SRS Plus 型多通道探地雷达系统,系统总扫描速率是 1 800 扫描线/秒。如果同时使用 4 个通道,每个通道的扫描速率为 450 扫描线/秒。2011 年至 2012 年,美国 GSSI 公司推出 SIR-30 型多通道探地雷达系统,1~4 个通道,通道的脉冲重复频率为 730~800 kHz,通道的扫描速率为 932~990 扫描线/秒(每扫 512 个点)。SIR-30 型多通道探地雷达系统适用于 2.0 GHz 喇叭形天线,可用于道砟污染的检测。

0.3 车载探地雷达检测铁路道床路基的研究及应用现状

车载探地雷达应用于铁路可以分为道床检测和路基检测两种类型。道床检测主要检测道床的污染状态和道床的厚度。路基检测主要检测路基结构层的厚度和路基病害。

道床检测所用的天线中心频率在 1.0 GHz 左右,天线的类型主要是喇叭形天线。为了提高道床厚度的检测精度和用散射理论来评价道床污染,美国 GSSI 公司推出了 2 GHz 喇叭形天线。

路基检测所用的天线中心频率主要有 300 MHz、400 MHz 和 500 MHz 天线。天线的类型有喇叭形天线和平板天线两类。西安铁路局科研所和西安交通大学研制的 300 MHz 天线为小喇叭形,全金属屏蔽。俄罗斯 GEOTECH 公司 300 MHz 喇叭形屏蔽天线与前者相似。IDS 公司采用 400 MHz 平板天线,德国 GBM Wiebe 线路施工和养路机械公司也采

用 400 MHz,但天线类型为喇叭形。美国 GSSI 公司采用 500 MHz 天线,喇叭形,但体积较大。

采用 1.0~2 GHz 高频天线,探测深度 1 m 左右,分辨率为 15~30 mm($\epsilon_r=6$),可以准确测出道床的厚度,划分出道床的结构层,如道砟层、底砟层和砂垫层。探地雷达可以探测石砟层中大的异物,有利于大机清筛道床。根据石砟层的反射特性和散射特性,可以判断石砟的污染状况。目前,美国的 Illinois 大学、英国的 Edinburgh 大学、澳大利亚的 Wollongong 大学、芬兰的 Roadscanners Oy 公司都在研究用探地雷达数据评价石砟的污染指数。另外,高频天线可以较准确地探测路基顶面的几何状态和含水状态、翻浆情况以及道砟囊情况,为运营管理部门养护维修提供信息。

采用 300~500 MHz 的中频天线,探测深度 3 m 左右,分辨率 100~150 mm($\epsilon_r=6$),可以测出道床的厚度。根据横断面上石砟的厚度,可以判断出该断面的横向排水的好坏。尤其是有砟囊地段,如果横向排水好,冒泥的可能性小;如果横向排水不好,有可能形成冒泥病害。探地雷达可以划分出基床各结构层的厚度,如基床的顶层和底层,如果路基下沉,可以确定下沉的层位。探地雷达可以探测出基床中土的含水状态、基床顶层的冒泥情况,最直观、也最容易反映出路基的沉降量,还可以探测永久冻土路基的消融状况和季节性冻土的冻胀、消融状况。

0.4 铁路车载探地雷达检测路基的特点和意义

0.4.1 铁路车载探地雷达检测路基的特点

(1)铁路车载探地雷达能够全程连续、高密度地获取道床路基信息,同时采用多通道技术使信息立体化。其他物探方法都是接触式探测,如果全程连续、高密度测量,其工作量之大是很难想象的。大部分物探方法分辨率都比探地雷达分辨率低,如高密度电阻率法,极距再小,测点也不可能小于 1 m,而用于铁路路基检测的探地雷达测点一般只有几厘米到十几厘米。

(2)铁路车载探地雷达检测路基不影响运输、不占用维修天窗。铁路车载探地雷达可以与轨检车同车检测,不需要单独增加车次;如果单独车辆检测,可加挂在列车的尾部,不需要单独增加车次,只是在车站增加一次调车作业,对运输没有影响。

(3)铁路车载探地雷达检测路基效率高、费用低。铁路车载探地雷达按一天 8 个小时计可以采集 960 km 的数据。其检测费用仅为人工方式的 1/10。新线路基验收,如果用人工测量的方式,两人一组,每天测量 5 km,1 000 km 的线路,大约需要 200 天,而用铁路车载探地雷达系统测量,两个人仅需要 1 天。铁路车载探地雷达系统的测点密度是 5 cm 的点距,同时还可以得到其他路基信息。

(4)铁路车载探地雷达检测路基能够降低劳动强度,保证人身和行车安全。在运营线上若采用人工方式检测,只能在维修天窗时间内进行,检测人员和防护人员至少需要 5 人,检测人员推行小车,携带电源和设备,劳动强度较大。如果要测三个纵断面,一个天窗时间最多能测 1 km 线路。采用车载探地雷达,检测人员在车内工作,工作环境大大改善,人

身安全和行车安全都有保障。

0.4.2 铁路车载探地雷达检测路基的意义

铁路运输安全与轨道状态密切相关。轨道由轨道结构和轨道基础组成,铁路路基是轨道的基础。铁路路基状态关系到铁路运输安全。当铁路路基出现病害时,铁路工务部门往往采用传统的勘探方法如钻探、原位测试和物探等进行勘探。这些人工方法,只适应小范围的勘探,不能用于整个铁路网的路基普查。铁路车载探地雷达的出现,可以实现在短期内对全路运营线路路基病害进行全面普查。当铁路车载探地雷达检测速度达到 120 km/h 以上时,路基检测就可以与轨道检查同车检测,使全路运营线路路基病害检测常态化,实现路基数字信息化管理。

铁路车载探地雷达可以用于新线验收,能够在短期内对新建线路路基面的几何形态进行快速连续测绘,根据路基面的几何形态可以判断路基填筑是否达到设计高程和路基质量的好坏,与过去用人工测绘方法相比,效率提高了两百多倍。工效提高,缩短验收时间,尽快开通,又增加了运输效益,如果发现路基问题,也能在开通前及时整改,大大降低整治成本。铁路车载探地雷达可以纳入时速 200 km 线路联调联试,它能在极短的时间内给出路基面的形态,快速发现问题,及时整改。

0.5 铁路车载探地雷达检测路基的应用前景

0.5.1 既有铁路路基病害普查

既有铁路道床和路基状态的劣化会使轨道几何状态变差、钢轨损伤,直接影响铁路运输安全。根据加拿大铁路部门 1999~2006 年统计的数据(Moynihan & English, 2007),因轨道原因造成的列车脱轨事故占总列车脱轨事故的 29%。从 1999~2008 年的 10 年间,我国铁路因工务原因造成 54 起列车脱轨事故,其中多起列车脱轨事故是因路基病害和路基突然塌陷造成的。因此,既有铁路路基病害和路基下伏地质灾害对铁路运输安全威胁最大。而路基病害和路基下伏地质灾害又是隐蔽性病害和灾害,仅靠巡道工在线路上是不能发现的,需要用物探方法对路基病害和路基下伏地质灾害进行全面检测,明确病害、成因、类型、规模,以及在路基中的分布情况,为线路养护维修提供可靠的依据,以便能够及时采取工程措施,减少病害的发生、降低病害的危害程度,保障既有铁路的运营安全。

我国地域辽阔,地质情况复杂,气候差异较大,存在着各种特征土路基病害和气候变化引起的路基病害。能够引起路基病害的特征土有膨胀土、粉砂土、盐渍土、软土、湿陷性黄土等。东北、西北地区气候变化引起季节性冻土路基的冻胀和冻融,青藏铁路永久冻土可能融化引起路基病害。尽管工务部门努力整治,但在运营过程中,由于自然作用和其他因素,还会出现新的路基病害。在高原地区无人巡道线路,冻土路基状态定期检查更为重要。

0.5.2 运营线路路基下伏地质灾害的普查

我国碳酸盐系分布面积占领土面积的 20% 以上,达到 200 万 km^2 ,大量在建或规划中的铁路不可避免地穿越岩溶发育地区。我国目前岩溶陷穴隐患已经威胁到铁路运输安

全,浙赣线、沪昆线,湘桂线、焦柳线、贵昆线、南昆线、京沪线、川黔线、内昆线等都出现过岩溶塌陷问题。同时,极端气候引发或加剧了路基下岩溶塌陷等地质灾害。黄土地区每年雨季都会发生路基内因空洞引起的塌陷。因此既有铁路路基下伏地质灾害的普查是非常必要的。

0.5.3 新建铁路路基质量验收

新建铁路需要全线普查路基中的安全隐患,运营后需要经常检测路基状态,确保安全。而城市轨道交通线路的路基质量也需要检测,运营后需要经常检查路基状态。

参 考 文 献

- [1] Al-Qadi I L, Xie W, Roberts R. Scattering Analysis of Railroad Ballast Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Nondestructive Testing and Evaluation*, 2008, 41(6): 441-447.
- [2] Al-Qadi I L, Roberts R, Tutumluer E, et al. New Ground Penetrating Radar Analysis Techniques for Ballast Assessment. *Technology Digest*, 2009, TD-09-028, Association of American Railroads, Transportation Technology Center, Inc., Pueblo, CO.
- [3] Al-Qadi I L, Xie W, Roberts R, et al. Data Analysis Techniques for GPR Used for Assessing Railroad Ballast in High Radio-Frequency Environment. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(4): 392-399.
- [4] Al-Qadi I L, Xie W, Jones D L, et al. Development of a Time-frequency Approach to Quantify Railroad Ballast Fouling Condition Using Ultra-wide Band Ground-penetrating Radar Data. *Special Issue on Nondestructive Testing*, 2010, 19(10): 763-772.
- [5] Al-Nuaimy W, Gascoyne A E J. Train-Mounted GPR for High-Speed Rail Trackbed Inspection, *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2004)*, 21-24 June 2004, Delf, S. 631-634.
- [6] Berggren E G, Smekal A, Silvast M. Monitoring and Substructure Condition Assessment of Existing Railway Lines for Upgrading to Higher Axle Loads and Speeds. *Proceeding of 7th World Congress on Railway Research*, 2006.
- [7] Bold R D, O'Connor G, Morrissey J P, et al. New Analysis of Ground Penetrating Radar Testing of a Mixed Railway Trackbed. *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, 2010.
- [8] Brightwell S, Thomas M. Geophysical Assessment of Railway Assets-a Practical View. *Proceedings of 6th International Conference on Railway Engineering*, 2003.
- [9] Brough M, Stirling A, Ghataora G, et al. Evaluation of Railway Trackbed and Formation: a Case Study. *NDT & International*, 2003, 36(3): 145-156.
- [10] Butler D, Dawson J. Ground Penetrating Radar Investigation of Ballast on the CN and CP Rail Lines Near Ashcroft, British Columbia. 2006, Transport Canada Publication No TP 14607E, 26.
- [11] Carpenter D, Jackson P J, Jay A. Enhancement of the GPR Method of Railway Trackbed In-