

三维雷达探测技术在广西高速公路预防性养护中的应用研究

朱兰洋¹, 钱亮¹, 李书谊¹, 徐培渊²

¹中冶京诚工程技术有限公司, 北京

²北京劳雷物理探测仪器有限公司, 北京

收稿日期: 2022年11月29日; 录用日期: 2022年12月27日; 发布日期: 2023年1月4日

摘要

本文分析了高速公路传统养护方面存在的问题, 论述了预防性养护的比较优势, 建议在高速公路预防性养护中采用三维雷达技术对路面潜在病害进行定期动态检测, 防患于未然。作者分析了路面病害类型及成因, 介绍了三维雷达技术原理、探测方法, 选取广西高速公路典型路段作为试点, 采用新加坡DECOD三维探地雷达设备进行探测。本文经过数据处理, 结合图像识别经验, 得到相对准确的探测成果, 可为后续精准养护设计施工提供重要参考。本次试点探测有助于推广广西高速公路预防性养护的理念, 降低路面维修成本, 提高使用寿命和综合效益, 进而提升高速公路出行幸福感。

关键词

三维雷达, 高速公路, 路面, 探测

Applied Research of 3D Radar Detection Technology in Preventive Maintenance of Guangxi Freeway

Lanyang Zhu¹, Liang Qian¹, Shuyi Li¹, Peiyuan Xu²

¹Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing

²Greenview Geophysical Instruments Ltd., Beijing

Received: Nov. 29th, 2022; accepted: Dec. 27th, 2022; published: Jan. 4th, 2023

Abstract

This paper analyzed the problems in the traditional maintenance of freeway, introduced the com-

文章引用: 朱兰洋, 钱亮, 李书谊, 徐培渊. 三维雷达探测技术在广西高速公路预防性养护中的应用研究[J]. 应用物理, 2023, 13(1): 1-8. DOI: 10.12677/app.2023.131001

parative advantages of preventive maintenance, and suggested that 3D ground penetrating radar be used for regular dynamic detection in the preventive maintenance of the Guangxi freeway to find the potential problems of road surface and prevent accidents before. The authors analyzed the types and causes of pavement distress, introduced the principle and detection method of 3D radar technology, and selected typical sections of the Guangxi freeway as the pilot to detect by the Singapore DECOD 3D ground penetrating radar equipment. This paper obtained relatively accurate results through data processing and image recognition experience, which would provide a valuable reference for the accurate maintenance design and construction subsequently. This paper would help to promote the concept of preventive maintenance of the Guangxi freeway, reduce the maintenance cost of road surface, increase the service life and comprehensive benefits, and enhance the freeway users' sense of happiness finally.

Keywords

3D Radar, Freeway, Road Surface, Detection

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 广西高速公路路面传统养护方案存在一些问题, 如: 路面状况较差或者发生问题影响正常通行时才进行养护, 导致养护工程量较大, 耗费大量的养护资金, 路面每公里平均养护成本较高; 养护工作效率较低, 养护人员劳动强度较大; 业主单位对路面预防性养护的认识和实践不足, 创新意识不强; 被动进行传统养护, 成本较大, 同时影响路面使用寿命, 养护投入综合效益不高等。

近年来, 随着国内三维探地雷达技术在工程质量无损探测中的应用, 高速公路路面预防性养护领域也开始逐步试点推广三维雷达技术对路面潜在病害风险的动态探测, 以提升养护决策水平, 逐步改变被动养护局面。高速公路运营单位逐步建立路面潜在病害探测结果动态数据库, 分析评价路面状况变化趋势, 发现潜在病害风险, 防患于未然, 精准制定预防性养护方案, 主动降低养护压力, 提升运营管理水平 and 综合效益。

2. 探测技术原理

三维探地雷达是一种新型的无损检测设备, 不会对路面形成破坏性的损伤。探地雷达的基础理论来源于电磁波理论, 电磁波的传播受到介电常数与电导率的影响[1]。路面病害如空洞、松散等, 与良好密实的路面相比, 介电常数差异明显, 这是路面病害探测的物性前提。介电常数越大, 传播速度则越小, 介质对电磁波的吸收越多, 穿透性越弱。地层不同介质的介电常数的差异性直接影响电磁波的反射, 差异越大, 反射强度越强; 电导率越大, 电磁波在介质中所消耗的能量越多, 可穿透深度越浅。介质含水率增大时, 介电常数与电导率均增大, 不利于电磁波传播。

波长越短的电磁波, 传播的直线性越好, 反射性能越强, 所以雷达用的是微波波段的无线电波。三维雷达探测技术原理是通过发射天线向地下发射一系列宽频带短脉冲电磁波, 探测采用剖面法, 即发射天线(T)和接收天线(R)以固定间距沿测线同步移动的探测方式, 高频电磁波在介质中传播时, 其路径、电磁场强度和波形将随着所通过介质的电磁性质、几何形态而变化[2]。接收天线接收反射波信号, 通过雷

达主机记录反射回波的时间、相位、振幅、波长等数据，对其进行同相轴变化分析，经过计算机处理、图像合成等手段，得到反映地下目标物的位置和形态信息，进而发现路面潜在病害，防患于未然。

三维雷达探测技术的性能指标主要包括：探测深度与分辨率。

探测深度是三维雷达可探测的最大深度，三维雷达探测深度主要由天线频率和介质的介电常数决定。频率越高的电磁波在地下介质中传播时能量衰减越快，所以探测深度越小。介质的介电常数越大，电磁波在该介质中传播速度越低，同样的探测时间，探测深度就相对较浅。在实际外业探测工作布置中根据“高频测浅层，低频测深层”的经验进行三维探地雷达天线频率的选择。

分辨率决定了地球物理方法分辨最小异常介质的能力。分辨率可分为水平分辨率和垂直分辨率。水平分辨率是探地雷达在水平方向上所能分辨的最小异常体的尺寸；垂直分辨率是探地雷达在垂直剖面中能够区分一个以上反射界面的能力，具体是指探地雷达在垂直方向上所能分辨的最小薄层厚度[2]。因为薄层厚度小于调谐厚度，继续减薄时，其层顶与层底反射波的相消性干扰逐步增强，直至反射消失，不再有来自薄层顶底的各自反射面，只剩下它们的复合波，因此开始失去分辨能力，无法实现分层效果。

水平分辨率为：

$$R_F = (\lambda\gamma_0 + \lambda^2/4)^{1/2} = \left(\frac{c}{f\sqrt{\varepsilon}}\gamma_0 + \frac{c^2}{f^2\varepsilon}/4 \right)^{1/2}$$

垂直分辨率为：

$$R_T = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f} = \frac{c}{4f\sqrt{\varepsilon}}$$

式中： R_F ——水平分辨率， R_T ——垂直分辨率； λ ——波长， v ——波速， f ——频率， c ——电磁波在真空中的传播速度； ε ——介质的介电常数， γ_0 ——目标物深度。

三维探地雷达以水平切片展示探测成果，也可以任意方向的切片、动画视频或局部三维立体展示，形象直观，打破了二维雷达只能以剖面图展示成果的传统，改变了人们的读图习惯和思维方式，减少了对人经验的依赖，同时借助大数据、人工智能识别方法，极大提高了三维雷达探测图像解译的效率和准确度。

3. 探测路段概况

本次三维探地雷达试点探测路段位于广西百色至罗村口高速公路范围内，是广西百色革命老区的第一条高速公路，也是广西在岩溶地貌山岭重丘区实施沥青混凝土路面的第一条高速公路。该高速公路起点位于百色西互通立交，终点位于广西与云南交界罗村口，主线长约 55 公里，2005 年 12 月竣工。试点探测路段的路面结构，见表 1。

Table 1. Table of road surface structure stratification

表 1. 路面结构分层情况表

序号	路段范围	路面结构
1	K803 + 700 至 K837 + 100	4 CM 细粒式沥青混凝土上面层 5 CM 中粒式沥青混凝土中面层 6 CM 粗粒式沥青混凝土下面层 1 CM 沥青石屑下封层、透层 20 CM 水泥稳定碎石上基层 20 CM 水泥稳定碎石下基层 18 CM 级配碎石底基层

通过前期实地踏勘,发现路面病害多集中于高速公路的外侧车道附近,包括路面开裂、路面断裂下沉、路面波浪起伏、桥头连接处跳车等典型病害现象。笔者对路面病害现象及其产生原因归类分析如下:

1) 裂缝类病害

a) 横纵裂缝

山区昼夜和季节温差大,低温开裂造成横向裂缝。面层材料本身在低温时的收缩阻碍,会产生较大的拉应力,当拉应力超过材料的抗拉强度时,面层便会出现横向断裂。水泥稳定基层裂缝反射到面层将形成纵向裂缝,在水的不断侵蚀下,逐步发展成网状裂缝。

b) 块状裂缝、龟裂

面层沥青混合料老化、粗细料级配不合理是造成块状裂缝、龟裂的主要原因。路面初期病害为纵横向单条裂缝,逐渐发展为块状裂缝,进而形成龟裂。

2) 变形类病害

a) 搓板

外侧车道为大型车辆车道重载交通量大,沥青路面在受到车辆反复荷载和紧急刹车拖拽产生的纵向拉应力过大时,将出现推移病害,进而形成搓板。

b) 车辙

车辙是行车荷载、环境条件与沥青混合料自身特性共同作用的结果,主要分为内因和外因两方面:内因主要是沥青混合料及结构厚度;外因主要是行车荷载、环境因素、施工因素等。

3) 松散类病害

a) 坑槽

由于水分渗入龟裂处,一些基层材料被车轮带走,基层表面被逐步淘空,最终导致沥青路面面层下沉产生坑槽。

b) 松散

由于基层的压实度不够,导致路面结构整体下沉,车辆的碾压及长时间雨水的侵蚀造成面层沥青的分块开裂,最终形成松散。

4) 地下异常体类病害

地下异常体病害包括空洞、脱空、疏松、富水等。在本试点探测路段主要为路基的早期空洞、桥头的早期脱空、桥涵构筑物周边的早期疏松等。

根据以上归类分析可知,前三类表现性病害可通过目视观察、弯沉仪、钻芯取样分析等常规手段发现并处理,但对于隐蔽于面层下的空洞、脱空和疏松等地下异常体病害,则需要采取新的检测技术手段方可发现。因此,本文选取 5 处代表性路段作为试点,对其潜在病害进行三维雷达探测。每段探测长度不少于 50 米/车道,探测深度范围 1.5 米。试点路段具体探测位置和相应路面的表现情况,见表 2。

Table 2. Statistical table of detection locations and road surface conditions

表 2. 探测位置和路面情况统计表

序号	试点桩号	探测位置	路面环境描述
1	K811 + 844.3 到 K812	外车道靠右轮	表面有裂缝和块状修补
2	K813 + 104.9 到 K813 + 200	外车道靠右轮	表面有横向裂缝、沉降
3	K837 + 100 至 K837 + 050	外车道靠右轮	桥头与路连接处有沉降
4	K803 + 700 到 K803 + 800	外车道靠右轮	表面有横向、纵向裂缝
5	K806 + 100 到 K805 + 900	外车道靠右轮	表面裂缝修补打眼灌浆

4. 探测方法与技术设备

4.1. 外业采集

本次为试点探测，外业采集在确保数据真实有效、成果可反映设备与技术性能优势的前提下，尽可能提高探测效率，简化采集方法。通过前期的实地踏勘，发现试点路段的路面破损多存在于外车道右轮迹带附近，故结合路段实际情况，最终确定仅在外车道靠右轮一侧的路面上进行 1.8 米宽的覆盖式探测，以车载三维探地雷达和 GPS 测量设备进行现场实时数据采集，见图 1。

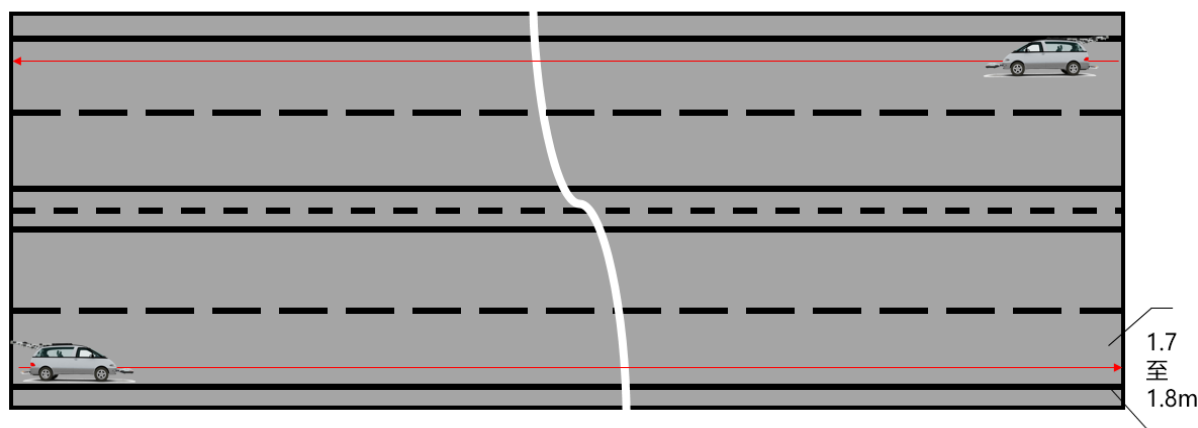


Figure 1. Field work distribution map of 3D radar

图 1. 三维雷达外业测线分布图

4.2. 内业处理

本次试点探测的内业数据处理是基于 DECOD UWB 计算软件的三维雷达数据自动处理，采用三维层析成像分析解释方法进行成果图像判别。

在图像解译前，先梳理分析以下资料：

- 1) 经过处理后的三维地质雷达数据、测线束坐标数据；
- 2) 三维地质雷达探测现场记录；
- 3) 前期收集的有关资料。

重点异常体的解译，除采用纵横向垂直剖面 and 水平时间切片外，还采用任意方向切取垂直剖面、属性体分类技术等综合解译，先采用人工智能雷达图谱异常体识别技术进行自动识别，再由技术人员针对识别出的异常体进行定性解译。

在具体图像解译时，先根据三维地质雷达不同方向切片的同相轴及振幅、相位和频率等属性特征提取异常体，再结合踏勘资料及探测现场记录的干扰源资料，排除干扰异常体，将有效异常体与经过验证的异常体图谱进行对比分析，确定异常体的属性，再确定异常体的位置、尺寸、埋深，在雷达切片上进行注释。

4.3. 探测设备

考虑到满足高速公路的外业采集实际工作要求，本次试点探测选用车载三维雷达探测，与新加坡 DECOD 公司进行技术服务和设备合作，探测设备的具体配置清单，见表 3。

Table 3. List of 3D radar detection equipments
表 3. 三维雷达探测设备清单表

序号	名称	规格/备注说明	数量
1	DECOD Mobyscan 车载 三维探地雷达	搭载 900 M 天线阵 及 2000 M 天线阵	1 套
2	探测车辆	中型面包车, 用于运输及安装设备进行探测	1 台
3	笔记本工作站	处理数据	2 台
4	钻孔取芯机	成果检查	1 台
5	蓄电池或动力电池	12 V, 可充电	1 台
6	电池充电器	12 V	1 台

4.4. 技术指标

本次试点探测采用新加坡 DECOD 三维探地雷达设备, 其主要性能技术指标如下:

- 1) 探测水平分辨率: ≤ 50 mm;
- 2) 探测垂直分辨率: 探测深度的 1%~7%;
- 3) 三维阵列天线覆盖宽度: ≥ 1.8 米;
- 4) 探测深度: ≥ 1.5 米;
- 5) 三维阵列天线通道数: ≥ 32 个通道;
- 6) 精细化采集行驶速度: ≥ 20 km/h;
- 7) 供电及功率为: 12 V/150 W, 蓄电池供电;
- 8) 数据处理效率: 24 小时/100 公里·测线。

5. 探测成果

经过实地探测和数据图像分析, 得出试点区段的探测成果。因为篇幅所限, 本文仅以 K803 + 737 至 K803 + 755 段为例, 进行探测成果研究分析。本段三维雷达的现场探测实际外业场景和获取的三维雷达探测图像成果, 见图 2、图 3。



Figure 2. Field work site of 3D radar detection
图 2. 三维雷达探测外业场景

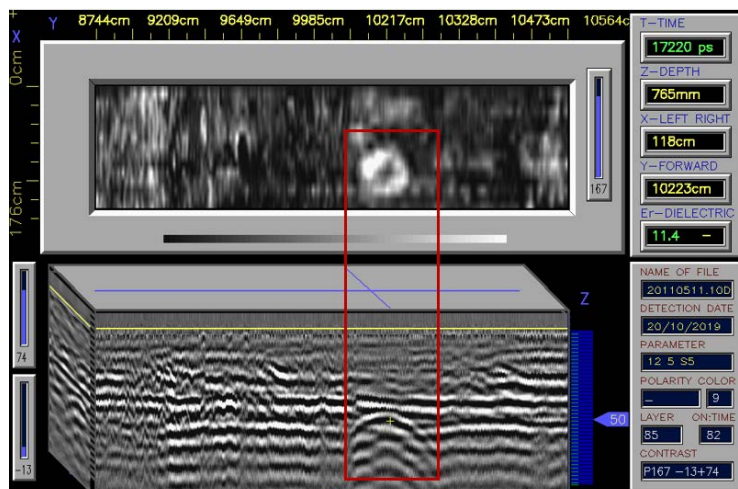


Figure 3. Detection image results of 3D radar detection
图 3. 三维雷达探测图像成果

根据图像的波组形态、振幅、相位和频谱结构等特征分析,该层析平面图中红色方框内存在圆形向外扩散状的白色高亮反射,能量强,与周围灰黑色背景或不规则反射差异明显,从垂直剖面图看,红框内存在明显的双曲线异常,基本吻合地质异常体空洞的如下图谱特征:

- 1) 水平切片:顶部呈与空洞水平形状相近的闭合图形,图形内部色系单一,随着时间、深度变大,图形形状随着空洞的变化而变化,图形内部逐渐变成雪花状。
- 2) 垂直剖面:似球形空洞反射波组表现为倒悬双曲线形态。

通过垂直剖面可以看出,深度自 70 cm 处向下发育,通过平面层析图 X 轴坐标,可以得知病害区域横向位于阵列天线 75 cm 至 175 cm 区域,宽约 1 米。通过平面层析图 Y 轴标尺,可以读取病害区域纵向位于 k803 + 757 至 k803 + 759 区域,长约 2 米。

通过三维层析图像,此处为孤立目标图像,线状特征,故排除管道,结合车载摄像头、现场调查资料,最终判定此处路面基层存在空洞病害。根据探测结果,结合养护实施经验,作者建议在此处进行路面预防性养护,采用注浆方案填补空洞。

作者建议在后续高速公路大面积探测的成果检查验收环节采用实地复查的方法,检查数量为总病害数量的 5%,每 10 公里车道不少于 1 个检查点[3]。根据数据库输出的病害深度和尺寸信息,使用地表观测、钻孔取芯、复合检测等手段进行复查,进一步验证探测成果与现场实际情况的接近程度。

因为现有技术装备水平和外界影响因素所限,探测成果不可避免会有一定误差,但随着三维雷达探测理论、方法、技术设备和实践的不断深入,高速公路路面探测成果将更加准确,更精准服务于预防性养护设计和施工。

6. 结语

本文通过对广西高速公路路面三维雷达试点性探测和成果进行研究,旨在进一步在岩溶地区推广高速公路路面预防性探测养护的变革新理念,具体包括:

- 1) 由不到路面翻新大修不检测,变革为常态化检测,以预防路面塌陷;
- 2) 由路面发现破损或塌陷后的事故性检测,变革为路面潜在病害风险的预防性探测;
- 3) 由探测成果的图纸存储,变革为三维数字化存储,动态管理数据库;
- 4) 由大量人工巡检、人工判读病害,变革为基于大数据、人工智能的动态分析、实时预警。

本文作者期待上述新理念得到进一步推广应用，通过对路面常态化探测，发现潜在病害，动态监测病害变化趋势，以三维定量分析病害寻找最佳养护时间，逐步实现精准养护设计和施工，避免路面带病服役造成二次破坏，降低路面维修成本，提高路面使用寿命，大幅提升高速公路安全通行保障水平和社会形象。

参考文献

- [1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 中国标准化协会. T/CAS 516-2021 道路三维探地雷达探测技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.