

高动态探地雷达快速检测参数确定与重复性分析^{*}徐晨晓¹, 臧国帅², 李一鹤²

(1.重庆高速公路集团有限公司, 重庆 404100; 2.江苏中路工程技术研究院有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 采用高动态探地雷达进行沥青路面结构完整性快速检测, 从检测环境、雷达天线频率和高度、检测速度、测线布置方式等多个维度出发进行高动态探地雷达检测影响因素分析, 明确检测参数, 并选取典型高速公路进行重复性验证。结果表明, 路表潮湿会形成镜面反射, 造成中心频率振幅区分度下降, 导致根据雷达图像无法准确识别病害; 考虑行车颠簸和雷达信号损失, 建议将车载式探地雷达的离地高度设置为 5 cm; 天线频率选为 700~1 000 MHz 时可用于半刚性基层沥青路面结构层全厚度检测; 随着检测速度的提高, 雷达信号中空数据道占比增大; 随着测线位置偏离轮迹中心, 雷达检测结果偏差增大; 雷达检测对隐性病害位置的纵向偏差不得超过 0.4%, 评价结果的平均相对偏差仅为 1.2%, 雷达检测具有很好的重复性。

关键词: 公路; 沥青路面; 结构完整性; 高动态探地雷达; 检测参数

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0064-05

JTG 5421—2018《公路沥青路面养护设计规范》针对修复养护中的专项数据检测增加了结构完整性检测内容。探地雷达检测具有连续性好、精度高等优点, 适用于路面结构完整性无损检测^[1-3]。程博文等通过雷达检测设备与 Pavecheck 软件提取道路每个区域的相对介电常数, 提出了一种针对道路沉陷、松散类病害区域的图像模拟方法^[4]。王方立等利用三维探地雷达进行沥青路面全断面扫描测试, 获得了沥青路面的介电常数样本和评价范围, 并对沥青路面大面积施工过程中的离析程度进行了分析^[5]。臧国帅等采用探地雷达和高速弯沉仪进行联合检测, 分别从结构完整性和结构强度方面提出了结构内部状态评价方法、评价指标和评价标准, 并进行了实例分析^[6]。徐昕军等提出了一种基于探地雷达与概率神经网络的城市道路路基病害预警模型^[7]。本文研究采用高动态探地雷达检测沥青路面结构完整性的检测参数, 并选取典型高速公路进行重复性分析。

1 高动态探地雷达检测设备简介

1.1 检测原理

路面结构的完整性可采用探地雷达进行检测。探地雷达以宽频带、短脉冲的形式将高频电磁波由地面通过发射天线 T 送入地下, 经地下地层或目标

体反射后返回地面并被地面接收天线 R 接收, 通过对接收波场的成像分析获取地下目标的探测图像(见图 1)。

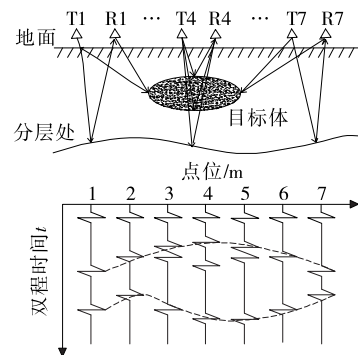
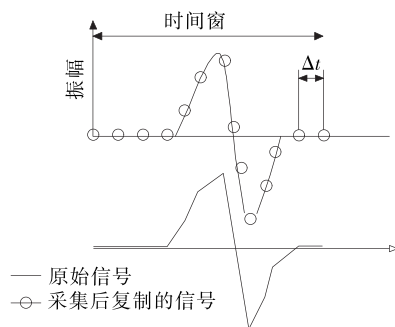


图1 目标体的探地雷达检测波形示意图

传统探地雷达采用点采样技术, 每个采样周期都会发射一个完整的脉冲信号, 接收机记录其中一个点的信号, 须发射 N 次脉冲信号才能完成单道脉冲信号记录, 从而形成完整的脉冲信号。高动态探地雷达采用实时采样技术, 发射一次雷达脉冲信号即可采集完整波形, 其检测速度比传统雷达快(见图 2); 同时采用高动态技术, 其脉冲信号的噪声水平更低且带宽增加(见图 3), 因而信号接收精度、数据分辨率更高, 探测深度更大。因此, 采用高动态探地雷达检测高速公路隐性病害, 既可保证检测速度, 又能满足高精度、高分辨率的要求。

^{*} 基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-gksbX0075)



Δt 为采样周期;采样频率 $=1/\Delta t$;时间窗 $=(\text{样点数}-1)\Delta t$

图 2 实时采样技术

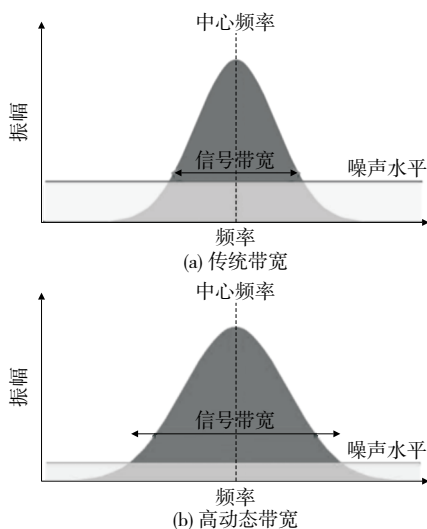


图 3 传统带宽与高动态带宽对比

1.2 检测设备

瑞典 MALA GX750MHz 高动态探地雷达为 MALA 第四代探地雷达,其天线与控制系统为一体机(见图 4)。它是一种车载探地雷达系统,将雷达通过支架悬挂在工程车上或将雷达置于天线小车上,天线小车由工程车牵引前行,检测人员在工程车

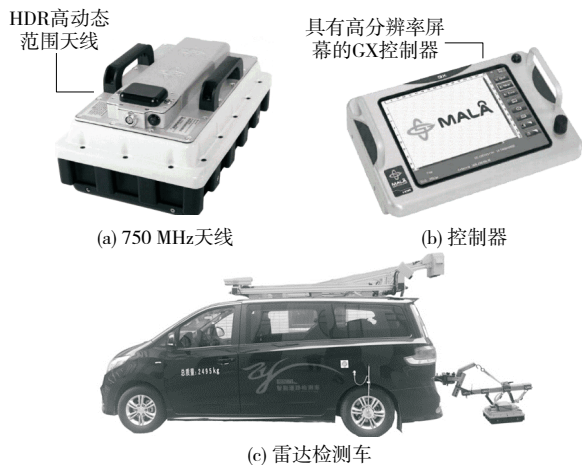


图 4 MALA GX750MHz 高动态探地雷达

内部通过操作计算机控制雷达的工作状态。相比人工方法,车载雷达具有许多优点:可以一次性全断面检测,且适用于长距离检测,可大大提高检测效率;检测人员的安全有保障;不影响正常的道路通行。

2 检测参数确定

2.1 检测影响因素分析

高动态探地雷达检测的影响因素众多,包括检测环境、雷达天线频率和高度、检测速度、雷达测线布置方式等,对这些因素的影响进行分析,进而确定雷达检测参数,提高检测结果的准确性。

2.1.1 检测环境影响分析

2.1.1.1 高压线对探地雷达检测的影响

随着电网覆盖范围的增大,在进行高速公路病害检测时,不可避免地穿越高压线下方。图 5 为高空 30 m 处高压线对 MALA 100 MHz 屏蔽式天线的

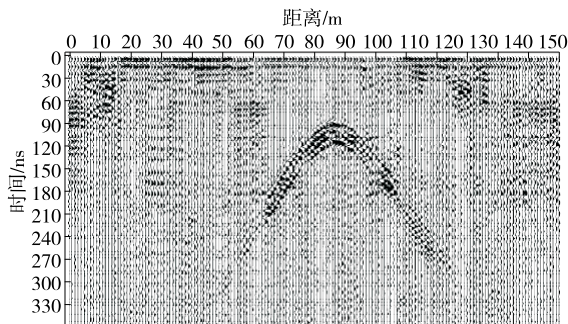


图 5 高压线对探地雷达的影响

由图 5 可知:对应于高压线位置 85 m 处,雷达图像形成强烈的反射弧,两边对称呈双曲线分布,若不考虑高空中高压线对探地雷达检测波形的影响,可能误判为该处存在地下与测线方向垂直的异常体病害;高压线的影响范围约为高压线前后各 40 m。

2.1.1.2 路表水对探地雷达检测的影响

选取典型道路进行人工洒水,模拟路面积水,分析路表水对探地雷达检测结果的影响。随着路表水分逐渐蒸发,路表呈现干燥状态→有水状态(潮湿)→半干状态→基本无水状态,其中有水状态会发生明显镜面反射现象,半干状态不存在明显镜面反射现象,基本无水状态时路表颜色由黑色变为灰色。分别在不同路表状态下进行雷达测试,检测结果见图 6,图 7 为路表干燥状态和有水状态下同一道信号的单道波频率谱对比。

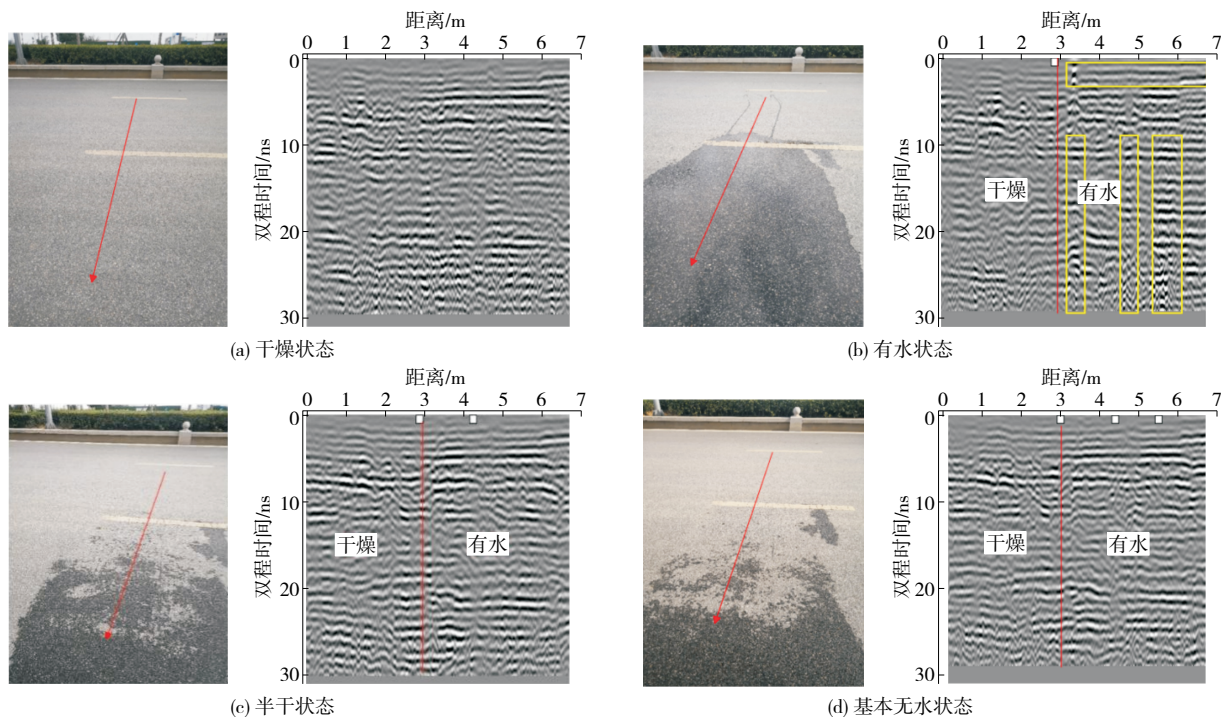
由图 6 可知:路表处于干燥状态时,路面面层与

基层之间存在明显的层间不良病害;雷达测试由干燥的第二车道进入有水的第三车道时,雷达信号多次震荡,图像的分层变得不清晰,且层间不良变得不易识别,无法准确判断结构内部完整性状态;路表处于半干状态和基本无水状态时,雷达测试结果与干燥状态基本一致。

由图 7 可知:路表有水状态下高、低频信号振幅

靠近中心频率信号的振幅,造成中心频率振幅区分度下降,显著影响病害识别准确度。

综上所述,考虑到路面潮湿会形成镜面反射,不利于雷达信号穿透,路面潮湿时禁止进行雷达检测。路表处于半干状态时,探地雷达检测图像分辨率明显提升,能满足病害准确识别需求,可开展探地雷达检测。



路表箭头代表雷达测试行进方向

图 6 路表水对探地雷达检测的影响

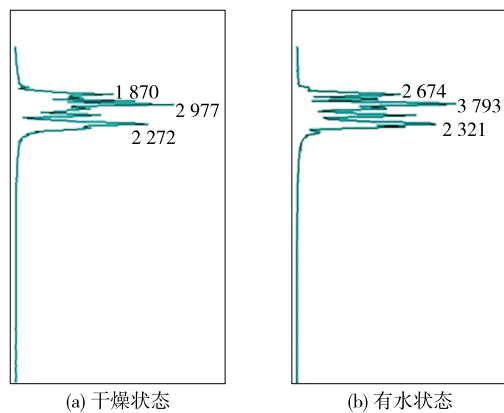


图 7 路表干燥状态和有水状态下频率谱对比

2.1.2 雷达天线频率影响分析

探测深度及层位决定天线中心频率的选择,合适的天线频率是准确探测目标深度隐性病害的保证。一般情况下,高频天线探测精度较高,低频天线探测精度较低。但高频天线能量扩散较大,探测深

度较浅;低频天线能量扩散较小,探测深度较深。通常情况下,路面内部隐性病害的深度和尺寸较小,可采用高频天线探测;路基较深处隐性病害的深度和尺寸较大,可采用低频天线探测。表 1 为不同探测深度处天线中心频率选择建议。

表 1 不同探测深度处天线中心频率选择

路面探测深度/cm	天线中心频率/MHz	纵向最小分辨率/cm
0~20(沥青面层)	2 000~2 500	≤ 0.5
20~70(基层、底基层)	700~1 000	≤ 1.5
70~200(底基层下面的土基、浅层管线、构造物)	500	5.0

2.1.3 雷达天线高度影响分析

由于车载式探地雷达需要通过空气介质才能到达沥青路面,而空气介质会大大干扰电磁波信号,雷

达天线高度直接影响检测数据质量。天线高度设置应遵循以下原则:

(1) 应避免将天线离地高度设置为天线中心频率波长的 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 、 1 的倍数关系,如 750 MHz 天线,其波长 λ 为 40 cm,天线离地高度应避免设置为 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm。

(2) 应尽量降低雷达天线离地高度,减少电磁波信号损失,同时考虑车辆颠簸导致的雷达起伏,天线高度不宜低于 5 cm。

(3) 天线离地高度 h 建议设置为 $5 \text{ cm} \leq h < 1/4\lambda$ 。

2.1.4 检测速度影响分析

分别以 30 km/h、50 km/h、60 km/h、70 km/h、80 km/h、90 km/h 和 100 km/h 的行车速度对典型道路进行探地雷达检测,分析行车速度对车载雷达检测的影响。结果表明,行车速度越快,数据中的空数据道越多,在影响精度的同时,会造成图像偏移增大,导致数据质量降低。不同行车速度下空数据道占比见图 8。

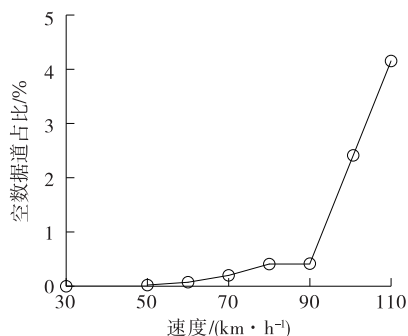


图 8 检测速度对雷达检测效果的影响

由图 8 可知:行车速度为 30 km/h 时,空数据道占比为零,不会影响车载雷达的数据采集;随着速度的增大,空数据道占比增大,速度为 90 km/h 时,空数据道占比显著增大,车载雷达采集的数据质量急剧下降。因此,在使用车载雷达对高速公路进行检测时,行车速度应不超过 90 km/h。

2.1.5 测线布置方式影响分析

高速公路沥青路面车道宽度为 3.75 m,受行车荷载影响,同一车道不同位置的路面结构内部完整性存在一定差异。对轮迹带处路面结构完整性进行测试,测试对象为最外侧车道,测线布置见图 9(a),不同测线的路面结构完整性评分 I_{PCI} 偏差见图 9(b)。

由图 9(b)可知:以轮迹带中间(距标线内侧约 80 cm)为中心点,±20 cm 范围内 I_{PCI} 偏差较小,在

2% 以内;范围 $> \pm 20 \text{ cm}$ 时, I_{PCI} 偏差明显上升。因此,在开展探地雷达快速检测时,探地雷达天线中心应保持在轮迹带中心 $\pm 20 \text{ cm}$ 范围内,以确保检测数据的一致性。

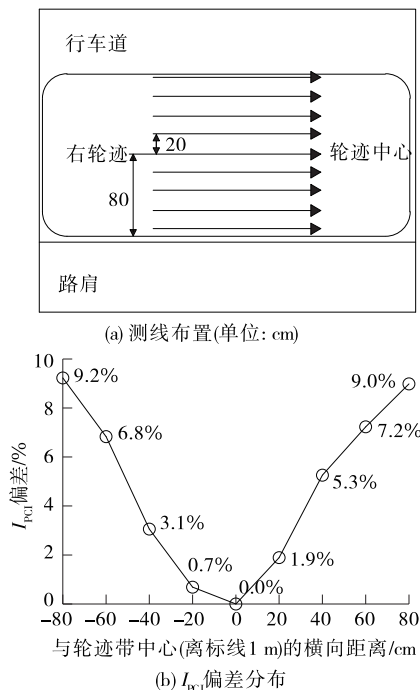


图 9 测线布置方式对雷达检测效果的影响

2.2 检测参数

综上所述,高速公路探地雷达检测参数应满足表 2 的要求。

表 2 高速公路探地雷达采集参数要求

项目	技术要求
检测设备类型	屏蔽天线型探地雷达
天线频率/MHz	700~1 000
天线离地高度 h /cm	$5 \text{ cm} \leq h < 1/4\lambda$
采样间隔/(cm · 道 ⁻¹)	≤ 2.0
天线与主机连接方式	光纤/无线
工作温度/℃	-20~50
速度变异性/%	≤ 5
与低速检测(5~10 km/h)	
相关系数 R	≥ 0.95
距离测量相对误差/%	± 0.1
测线位置	轮迹带中心 $\pm 20 \text{ cm}$
路表状态	路表未形成水膜(无镜面反射)
检测速度/(km · h ⁻¹)	60~90

3 检测重复性分析

为验证高动态探地雷达检测结果的重复性,选取某高速公路下行方向 K90+000—K95+000 进行重复检测,分析雷达图像重复性结果和结构完整性评分的差异。

3.1 雷达图像重复性分析

雷达图像重复性检测结果见图 10。

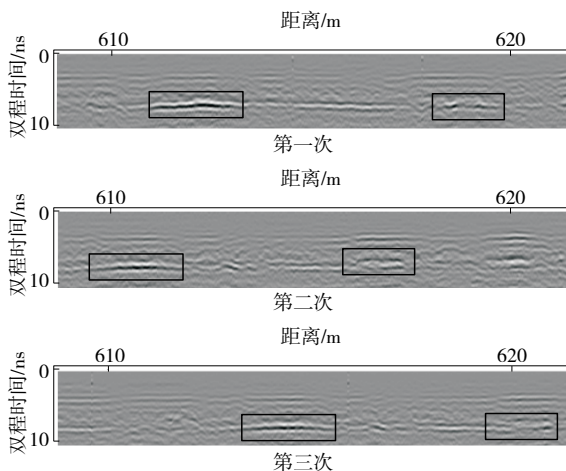


图 10 雷达图像重复性检测结果

由图 10 可知:根据 3 次雷达检测图像均可在同一桩号位置附近发现同一结构病害,病害出现位置基本一致,病害类型及位置在 3 次检测结果中都可以对应,检测里程为 1 000 m 时,3 次检测位置偏差最大为 4 m,偏差为 0.4%,验证了雷达检测的重复性。

3.2 结构完整性评分重复性分析

分别对 5 个路段路面结构完整性进行 3 次检测,检测结果见图 11。由图 11 可知:各路段 3 次检测的结构完整性评分很接近,平均偏差仅为 1.2%,雷达检测具有很好的重复性。

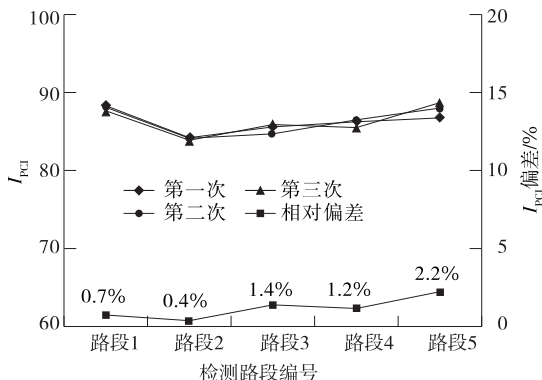


图 11 不同路段的结构完整性评分

4 结论

(1) 检测环境中高压线和路表水的存在会显著干扰探地雷达检测结果,其中高压线的影响范围为高压线前后各 40 m。路表潮湿会形成镜面反射造成中心频率振幅区分度下降,导致根据雷达图像无法准确识别病害。

(2) 考虑行车颠簸和雷达信号损失,建议将车载式探地雷达离地高度设置为 5 cm。天线频率为 700~1 000 MHz 时可用于半刚性基层沥青路面结构层全厚度检测。

(3) 随着检测速度的提高,雷达信号中空数据道占比增大,速度为 90 km/h 时数据质量急剧下降,行车速度应不超过 90 km/h。

(4) 随着测线位置偏离轮迹中心,雷达检测结果的偏差增大,测线位置偏差 < 20 cm 时,结构完整性评分偏差 < 2%。

(5) 采用动态探地雷达进行路面病害检测,隐性病害位置纵向偏差不超过 0.4%,评价结果的平均相对偏差仅为 1.2%,雷达检测具有很好的重复性。

参考文献:

- [1] 杨美群,邹友泉,刘静.探地雷达在高速公路路面隐性病害检测的应用[J].公路,2022,67(8):86-91.
- [2] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准:JTG 5210—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [3] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面养护设计规范:JTG 5421—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [4] 程博文,罗蓉,孙通,等.道路沉陷松散类病害的探地雷达图像解译与分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(4):728-732.
- [5] 王方立,阮坤,李伟雄.基于三维探地雷达的沥青路面混合料施工均匀性评价研究[J].路基工程,2020(4):163-169.
- [6] 臧国帅,金光来,蔡文龙,等.基于探地雷达和高速弯沉仪的结构内部状态评价[J].公路与汽运,2020(3):59-61.
- [7] 徐昕军,勾妍妍,杨峰.基于探地雷达与概率神经网络的城市道路路基病害预警模型研究[J].科学技术与工程,2017,17(17):118-124.

收稿日期:2022-10-19