

探地雷达技术在城市道路病害探测的应用

徐星* 韩晓鸣 潘临

深圳市赛盈地脉技术有限公司 深圳 518300

【摘要】 现今运营道路中病害频发，对于社会经济、交通安全和人身权益受损影响愈发严重且广泛，因此能够做好道路检测并及时发现城市道路病害，进行事前预防，事中控制处理，事后对所有病害进行动态管理显得尤为重要。探地雷达作为一种快速连续的无损道路检测方式，检测过程中不影响城市道路正常运营，对于检测成果呈现直观有效。

【关键词】 探地雷达；城市道路病害；无损道路检测

城市道路塌陷事故屡见报道，常常发生各地塌陷大洞“吞噬”车辆和行人，严重威胁人民人身安全和造成财产损失。城市道路的路基病害体成因主要为地下排水管道渗漏破裂后冲刷路基和管道沟槽及构筑物周边施工压实不足等^[1]。使用 gprMax 对典型地下病害体做正演模拟^{[5][6]}，模拟空洞、脱空和疏松等典型病害体，并对波形信号进行分析和总结，为探地雷达技术在探测道路病害体中提供理论依据。为做好在运营城市道路检测工作，目前使用最为广泛的检测方式是通过三维探地雷达车载检测模式进行连续扫描作业，快速识别道路下方病害体（疏松、空洞、脱空、富水体等等）^{[2][3][4]}。

1 探地雷达技术原理

探地雷达技术是通过发射天线不断发射电磁波，电磁波在通过介电常数差异界面时会同时发生折射和反射，而与此同时接收天线也不断接收发射回来的电磁波，然后通过主机处理反射回来电磁波进行信号处理和分析，根据信号生成波形、强弱和时程差等来推断异常空间位置、几何形态，将异常情况通过图像反应出来。

处理三维探地雷达扫描生成的含 GPS 坐标数据的原始雷达数据文件，以生成水平切片和剖面图。水平切片可以有效地显示埋藏目标的大小、形状、位置和深度。相邻雷达图轮廓之间无法区分的细微反射特征可以在从 3D 体积数据集创建的水平切片上进行成像和检测。GPR 数据的水平切片大大提高了这种相对较新的地球物理工具的质量和实用性，适用于各种应用。经过滤波、增益、背景去除、切片等数据处理后，通过处理软件生成异常体体积空间展布三维模型。雷达数据以剖面影像呈现，图像为多条数字化的电磁波波形的叠合，以不同色调表示振幅强弱。

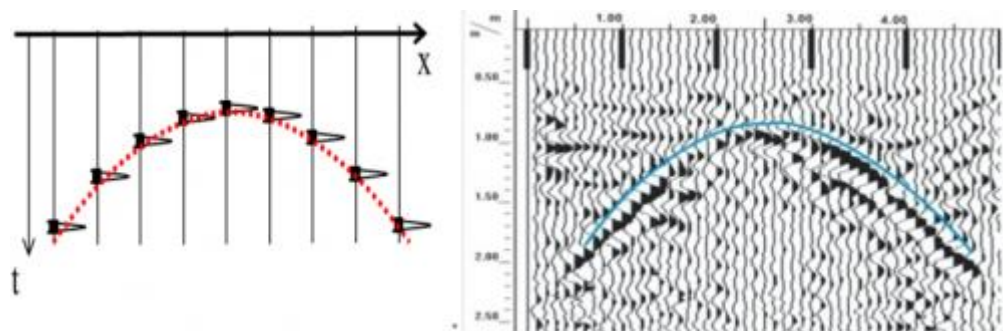


图1 探地雷达双曲线特征图

2 探地雷达正演模拟

常见的道路病害类型有路面脱空、路基下空洞、疏松等，城市道路大部分为沥青路面，沥青路面下脱空与水泥混凝土路面脱空类似，属于路面层与路基发生层间脱开形成脱空；路基中因为供排水管道渗水或其他原因导致掏空形成的空洞；疏松多是施工阶段或者运营阶段中开挖或施工回填不合理导

致。不难发现,疏松、脱空、空洞是道路地下病害体由深至浅的发展过程,是地下病害体发展不同阶段的体现。因此,道路病害中的空洞和脱空是探测中的重要关注点。

gprMax 是一款基于时域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 用于电磁波传播仿真的开源软件。主要是用于探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 的仿真与建模。

建立一个充气空洞的正演模型:模拟一个埋藏在路基垫层中的方形空洞正演模型,大小为 $4.8 \times 2.2\text{m}$,步长为 0.01 ,仿真的时间窗口为 50ns ,定义了四个介质材料,分别为沥青路面层,路基基层,路基垫层和充气空洞。激励源为 250MHz 的 Ricker 子波,正演模型图如下所示。

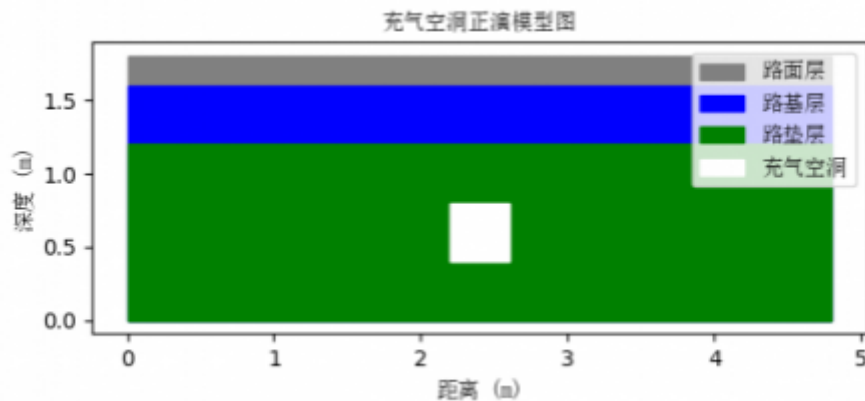


图2 充气空洞正演模型

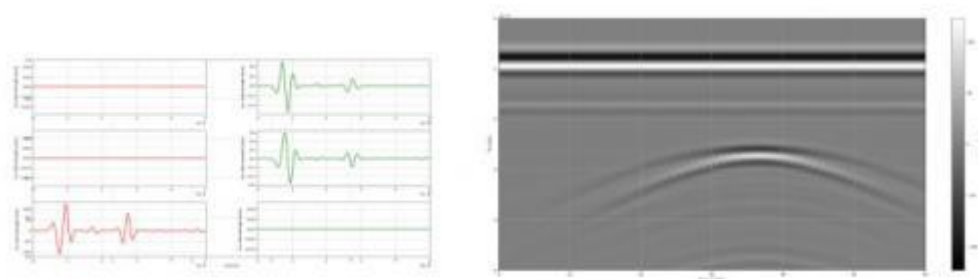


图3 gprMax 正演生成的 A-scan 和 B-scan 图

在图3左侧 A-scan 波形图中,在不同介质层位和空洞位置处,反射波的能量(振幅)明显增强,但反射相位等特征相反,如图中电磁波从路面层进入路基基层和路基基层进入路基垫层都是同相反射,说明从介电常数低的进入介电常数高的介质中,在介质层面发生的反射波与入射波同相,而电磁波由路基垫层进入充气空洞是反相反射,这时是从介电常数高的进入介电常数低的介质中,在该介质层面发生的反射波与入射波反相。在图3右侧 B-scan 灰度图中,空洞病害体在图谱上表现为双曲弧形的多次反射特征、反射波能量(振幅)的明显增强、反射波同相轴明显错乱、绕射等。

因此在雷达剖面的解释中,采用对比的方法来识别反射波的特征。如波组形态的变化,包含反射波的波峰或波谷沿测线上的波形、连续性,有无绕射波、多次波,振幅强弱变化,反射波的相位特征(顶部界面的正负相位变化),频率变化等。根据上述的雷达图谱特征变化,首先可以确定道路下方有无异常;再根据异常形态雷达图谱的不同来识别不同类型的病害体。

3 工程实例

城市排水管道大部分埋置于地下,由于前期施工质量、运营时间过长、城市地下空间建设扰动、城市道路长期载荷变化等等,不可避免对排水管道等造成影响,严重者甚至造成破损泄漏,导致水土流失形成空洞或脱空。因此对沥青道路排水管道周边范围内进行道路病害体探测,检测是否存在疏松、脱空、脱空和富水体等病害。

城市道路病害探测作业流程：通过三维探地雷达车载采集的方式，对探测区域进行快速普查作业，对采集回来的三维探地雷达原始数据进行数据处理和分析，经过分析后的异常点相关信息汇总，统一对这些异常点由外业人员使用二维探地雷达复测，经过复测为待验证的疑似空洞、脱空或严重疏松的病害进行百分百验证，验证后确认为空洞或脱空的病害需要收集病害信息，如病害面积尺寸、埋深和净空，使用内窥镜头收集病害内部的空间展布型态及病害的具体位置信息。

本次三维探地雷达选用的是三维探地雷达 MALA Mira 200MHz 进行道路探测。采样时窗和采样点数分别设置为 96.4ns 和 516，天线的中心频率为 200MHz，通道数为 16，通道间距为 0.08m，以天线中心为坐标零点。本次探测范围主要是全覆盖道路管线范围，且探测有效深度需达到道路下方 5m。复测所使用的二维探地雷达选用 400MHz 频率的雷达天线。下图是探测中发现的部分病害体的普查和复测图谱，可以发现基本与正演模型的波形分析后的病害体图谱一致。

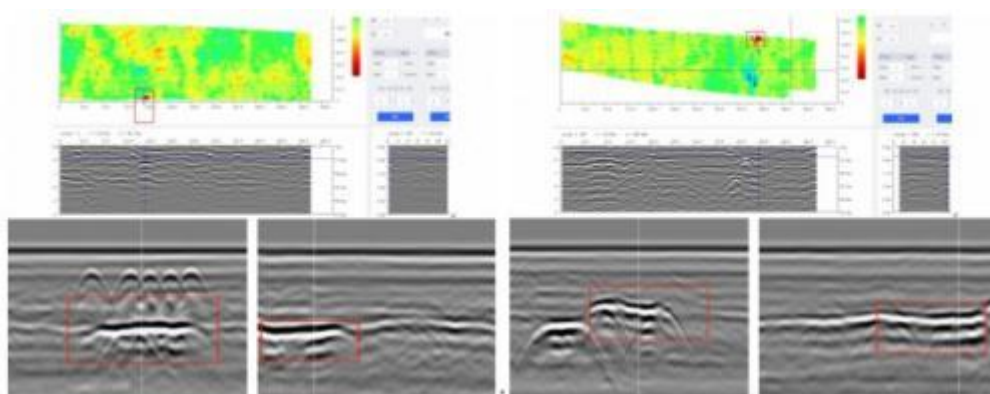


图 4 空洞病害探地雷达普查和复测图谱

4 结论

探地雷达技术目前广泛应用于道路病害体探测中，使用车载三维探地雷达对道路进行快速普查，二维探地雷达进行复测和验证工作，可以快速有效发现和定位道路下的病害体，结合 GPS 能够精确定位道路下的病害体，提供病害体的位置和深度信息，而且三维探地雷达是一种非破坏性检测，不会对道路结构造成损害，扫描速度快，能够在短时间内完成大面积的道路检测，且高密度的三维探地雷达测线扫描结果能够生成直观的图像，便于分析和解读。但是目前的三维探地雷达采集的数据量非常大，而数据的分析和解读基本靠人工，因此导致产生大量的人工成本和时间成本，未来能够通过机器学习算法自动识别和分类地下结构和病害体，使用 AI 分析三维探地雷达数据，提高数据处理的准确性和效率，实现自动化检测，减少人工干预，避免人为的误判和漏判。未来 AI 技术在探地雷达技术上的应用将给道路病害体探测等领域带来革命性的变化，使得探地雷达技术的应用前景更加广阔。

参考文献

- [1] 宁哲思. 道路路基病害体成因及修复探讨[J]. 上海公路, 2024, (02): 30-34+254.
- [2] 王大为, 吕浩天, 汤伏蛟, 等. 三维探地雷达道路隐性病害检测分析与数字化技术综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(03): 1-19. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.03.001.
- [3] 房巨山, 王君玲. 兰州市道路地下病害体探地雷达图像解译分析[J]. 地矿测绘, 2021, 37(03): 20-24. DOI:10.16864/j.cnki.dkch.2021.0042.
- [4] 马强. 三维探地雷达在公路病害检测中的应用[J]. 设备管理与维修, 2023, (10): 92-93. DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.05D.41.
- [5] 叶治军, 曹保峰. 探地雷达正演模拟及其在道路病害探测中的应用[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(02): 162-166.

[6]杨洁,王云龙,张雪,等.基于正演模拟的地下典型目标体探地雷达图像特征分析与评价[J].科学技术与工程,2023,23(20):8540-8551.