

探地雷达技术在道路检测中的应用

文 / 孙 勇 南通市建筑工程质量检测中心

摘要: 探地雷达作为一种无损探测技术,在复杂道路结构诊断中具备高分辨率和实时成像能力,适应当前道路检测精度提升的工程需求。文章研究了探地雷达的信号传播机制与系统参数构成,分析了其在结构层厚度测定、病害区域识别与材料界面解析中的应用路径,探讨了数据采集布设策略、信号降噪方法与图像特征提取流程。研究结果对推动道路检测智能化、精细化进程具有工程实践价值,为后续设备优化与算法集成提供数据支撑与技术参考。

关键词: 探地雷达; 道路检测; 结构层识别; 信号处理; 图像特征提取

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.061

引言

道路结构老化与交通负荷增长叠加引发了对高效无损检测手段的工程需求,探地雷达因具备连续性强、分辨率高与成像直观等特性,已在交通工程中逐步推广应用。其核心在于利用电磁波传播反射特性识别地下结构层界面与异常区域,配套系统参数配置与数据处理流程直接影响检测深度与图像精度。当前技术路径需聚焦雷达系统构成、信号传播规律、结构层厚度分析、病害图像识别以及采集路径布设与图像特征提取方法的技术协同。文章为明确其在道路检测中的工程适配性,围绕雷达原理、应用方法与处理流程展开系统研究,旨在构建完整的雷达检测技术逻辑,支撑设备配置优化与智能算法集成需求。

一、探地雷达的工作原理与系统构成

(一) 电磁信号传播机制

探地雷达探测的基本原理建立在高频电磁波在不同介质中传播速度差异与界面反射行为基础上,电磁波从发射端发出后,在非均质结构中传播时,其速度由介电常数决定,当遇到介电性能发生突变的结构边界时,部分能量发生反射,其余能量继续传播,反射波返回接收端形成有效信号^[1]。干扰源来自天然或人工电磁噪声、表层干扰波以及多次反射波干扰,需依靠时窗选择与带通滤波进行屏蔽。在多层结构中,电磁波存在多界面反射重叠的问题,不同深度反射信号的传播时间差构成雷达图像的纵向分辨基础,反射强度差异形成横向图像特征。信号传播路径受天线极化方向、波阻抗差异与材料湿度影响,波阻抗突变越大,反射越强,成像边界越清晰,若材料呈潮湿状态,其高损耗性导致信号衰减明显,深层结构探测精度显著下降。

(二) 系统组成与参数设定

探地雷达系统主要由发射天线、接收天线、控制主机、信号采集模块和图像分析平台构成,系统性能受天线类型与中心频率控制能力直接制约,高频天线具备较高的分辨率,适合探测浅层结构与细小异常,低频天线穿透能力强,适用于厚层结构与深层病害检测,需根据道路结构类型与检测深度需求选用不同频段设备^[2]。中心频率设定通常在 100MHz 至 2000MHz 区间,频率越

高,其波长越短,成像分辨率越高,穿透深度越小,选频需平衡探测分辨率与穿透能力之间的匹配关系。采样间隔影响雷达信号的时间分辨率与图像连续性,常采用 1.0 ~ 5.0ns 范围设定,采样密度越高,图像连续性与后期特征识别准确性越强。

二、探地雷达在道路结构层分析中的应用

(一) 结构层厚度检测方法

结构层厚度测定依赖雷达波在多介质结构中传播路径与反射时间的物理响应关系,波在各结构层之间传播时,速度受介电常数控制,不同材料层的波速不同,反射界面处产生回波信号^[3]。采集系统记录波从发射到接收的总传播时间,结合波在介质中的传播速度,可反推介质厚度。回波特征中以主反射峰为层界标志,需准确提取各层主峰间的时间间隔。时间精度依赖采样率与波形密度,速度精度取决于介电常数设定。实际工程中,波速校正常以钻芯样本为参考,用于校准雷达图像中的传播速度模型,使图像中回波深度与真实结构厚度建立对应关系。厚度计算公式如下:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

其中, d 为结构层厚度, v 为波在该介质中的传播速度, t 为雷达波从发射到反射再回到接收器的双程传播时间。该公式构成雷达图像分层厚度反演的核心计算路径,所需参数中, v 可由介电常数估算,具体关系为:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

式中 c 为真空中电磁波速度 (3.0×10^8 m/s), ϵ_r 为介质的相对介电常数。介电常数越大,波速越慢,导致单位时间内传播距离减小。该特性在厚度计算中会放大误差敏感性,介电常数偏差将直接传导至厚度误差,因此需在实际工况下根据材料类型、含水状态与温度变化进行现场修正或动态校准。

(二) 病害区域识别技术

病害区域的雷达响应特征由介质突变程度、结构扰动幅度与波形传播模式共同决定,脱空区内部为空气或极低密度材料,电磁波在此界面反射增强,形成振幅高、

回波清晰、拖尾短的特征信号，结构下层波形常出现能量衰减或完全消失^[4]。该区域图像中呈现为强对比亮带并伴随结构层断裂特征，反射边界明显，不连续性突出。裂缝区域根据形态不同产生两类扰动响应，纵向裂缝引发信号反射路径变化，波形断裂，主反射峰偏移；横向裂缝导致图像连续带中断或形成反射扰动区，反射带宽缩小，振幅降低，结构识别精度下降。含水区域介电常数变化幅度大，导致雷达波速降低、回波延迟、能量扩散加剧，信号表现为振幅增强与拖尾显著延长。图像上边界模糊，反射区域拖影明显，反射层界不清，层间纹理连续性差，图像对比度下降。不同类型病害区域在波形结构特征中表现出稳定的参数差异，可作为分类识别与异常检测的基础输入变量。脱空区域的主反射时间变

化幅度小，振幅峰值高，图像中形成规则反射高亮带，图像连续性断裂，后部信号缺失。裂缝区域主反射时间前移，振幅弱化，波形扰动局限，反射图像多表现为细带型暗区穿插于结构层边界，伴随层间错位或图像断带。含水区域主反射时间推迟明显，图像边缘扩散、拖尾范围大，拖尾时间超过 3ns 时常伴随图像模糊与误判风险上升。基于最大振幅、主反射时间、拖尾长度与反射带宽四类关键特征构建识别指标体系，可将复杂雷达图像转换为结构化数据变量，供自动识别模型判别病害类型与区域属性，提升病害区域识别的精度与稳定性。下表 1 为南通市崇川区虹桥路典型病害区域的雷达实测信号特征数据统计。

表 1 南通市崇川区虹桥路典型病害区域雷达实测信号特征统计表

病害位置	雷达波最大振幅(mV)	回波主反射时间(ns)	波形拖尾长度(ns)	图像反射带宽度(cm)
虹桥路 K0+320 疏松区	185.6	13.8	1.3	32.1
虹桥路 K0+450 裂缝带	92.4	11.5	0.7	18
虹桥路 K0+510 含水段	209.1	15.7	3.2	40.6
虹桥路 K0+700 严重疏松边界	176.8	14	1.1	29.4
虹桥路 K0+850 裂缝延展带	87.2	12.6	0.6	18.4
虹桥路 K1+020 饱水路段	215.3	16.4	3.5	42.7

虹桥路 K0+320 段疏松脱空区与 K0+370 基层边界的振幅均较高，主反射时间集中在 13.6ns 至 14.1ns，带宽接近 30cm，说明界面反射清晰。K0+450 裂缝带振幅偏低，主反射时间提前，拖尾较短，图像带宽较窄，反映出结构扰动程度较轻。K0+510 含水段振幅最高，反射时间明显延迟，拖尾显著拉长，图像带宽扩大，体现出波速下降与能量扩散特征。

(三) 材料界面成像方法

雷达图像中材料界面成像清晰度依赖于相邻结构层介电性质差异所引发的反射强度变化，波在介质界面传播时，当上下层材料介电常数存在梯度突变，将导致入射能量在该界面处产生部分反射与部分透射。界面反射强度决定雷达图像中边界亮度与结构连续性，若上下层材料介电差异不明显，反射信号幅度降低，界面响应模糊，造成层间边界不清，图像边缘难以识别^[5]。若材料组合为高密差异结构，如水稳碎石与沥青混合料之间，其波阻抗差异明显，反射界限清晰，图像分层效果稳定。雷达波在这些界面处的反射能力可量化表达为反射系数R，具体公式如下：

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}}$$

其中 ϵ_{r1} 与 ϵ_{r2} 分别为上层与下层材料的相对介电常数。反射系数越大，雷达波在界面处反射能量越强，图像中表现为边界亮度增强、图像清晰。若材料介电性能相近，则反射弱、界面模糊，需采用信号叠加、图像增强等技术提高边界识别能力。针对基层与底基层之间的微弱反射，常引入反射增强滤波与梯度边缘识别算法以提升边界对比度。

在工程应用中，不同道路结构层材料的介电常数范围差异决定了反射成像清晰度的物理基础。沥青层常处于 4.0 ~ 6.0 之间，水稳层通常为 7.0 ~ 10.0，基层或路基材料因含水变化呈现更高的动态变化幅度。若沥青层与水稳层之间界面波阻抗突变显著，图像表现为强反射线带，分层结构稳定且边缘清晰。若中间夹杂混合或扰动材料，如局部填料、冷接缝区域、临时修补层，其反射系数将随横向位置变动而波动，易形成图像边界模糊带。

三、探地雷达数据采集与处理流程

(一) 采集路径规划方法

探地雷达采集路径规划需根据道路结构构成、车道宽度与目标检测精度要求制定天线布设间距与行进速度参数，标准车道结构中，横向天线布设间距应控制在 25cm 至 50cm 之间，保证雷达覆盖区域无盲区，增强结构层图像连续性^[6]。在纵向扫描过程中，采集车辆行进速度直接影响波形采样间隔，需依据雷达系统采样率反向匹配控制速度，避免造成波形混叠与分辨率不足的问题。在高频率设备 (>1000MHz) 下，推荐采集速度小于 20km/h，以保证图像时域密度满足图像层边界还原的纵向精度需求。路径密度规划应结合目标区域病害分布概率、结构复杂程度与后处理算法识别精度设定纵横路径重叠率，复杂区域建议采用交叉布设或多角度扫描策略，提升异常区域边界响应的一致性。布设方案应配套 GPS 与 IMU 系统，实现天线位置与波形数据的实时绑定，避免采集过程中数据错位导致图像重建误差。

(二) 信号降噪处理技术

雷达回波中含有随机噪声与背景干扰，需进行信号处理以提升主反射结构的清晰度。时域平均滤波适用于

削弱短周期扰动信号，通过固定时间窗内积分求均值的方式提取主波形趋势。设原始波形为，滤波输出为：

雷达回波中含有随机噪声与背景干扰，需进行信号处理以提升主反射结构的清晰度。时域平均滤波适用于削弱短周期扰动信号，通过固定时间窗内积分求均值的方式提取主波形趋势。设原始波形为 $x(\tau)$ ，滤波输出为：

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) dt$$

该操作消除了局部高频振荡，在保留主反射结构的同时压制杂波能量波动，适用于均匀结构区域的波形清理。针对非平稳噪声或分层界面弱信号区域，需采用小波阈值压缩方法。信号经小波分解后得到各尺度下的分量系数 $\hat{w}_{j,k}$ ，进行软阈值函数变换处理，表达式为：

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} - \lambda, & |w_{j,k}| > \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| \leq \lambda \end{cases}$$

该操作在保留高幅值主要结构信息的同时，压制低幅值扰动，消除噪声扰动带来的图像边界模糊。阈值参数控制保留细节与去噪强度的平衡关系，低阈值易造成噪声残留，高阈值可能削弱有效反射。

(三) 数据特征提取流程

特征提取是将雷达图像中的结构层信息、材料属性与异常响应转化为可量化变量的关键步骤，直接影响病害识别与结构重建结果的稳定性与精度^[7]。在处理流程中，首先基于垂向波形反射曲线提取主反射峰值位置，采用幅值局部最大值搜索算法标定结构层界点；其后计算相邻主峰之间的时间间隔作为雷达双程传播时间，结合校正后的电磁波速度反推各结构层厚度。对图像区域特征提取中，引入灰度共生矩阵计算纹理分布特征，包括能量、对比度、相关性与熵值等指标，用于表征结构层界清晰度、材料分布均匀性及病害扰动强度。反射带宽、层间纹理梯度变化率与拖尾分布长度构成病害初判参数集合，可用于分类算法模型的特征输入。复杂图像中建议采用滑动窗口与区域识别结合的方式进行局部特征增强，避免边界模糊区域特征稀释。所有特征数据需进行归一化预处理，配合病害标签数据用于构建训练集与识别模型输入结构，支撑自动分层、异常识别与结构状态判定算法的快速部署。

下图1展示了雷达图像从原始输入到结构特征参数生成的处理路径，包括主反射提取、纹理与波形分析、特征集构建及模型输入流程。

该图1展示了雷达图像从输入到识别模型输入的结构特征提取流程，包括主反射峰提取与厚度计算、图像区域选取与纹理分析、波形特征分析与参数生成，最终汇总为结构参数数据，经归一化处理后用于识别模型训练或判定。流程结构清晰，逻辑分工明确。

结语

探地雷达在道路结构层检测中的应用依赖于电磁波传播机制与系统参数匹配，具备分层识别、病害定位与

图像重建的工程能力。结构层厚度反演基于双程时间计算模型，病害识别建立在振幅特征、反射时延与图像结构参数的多维提取基础上，界面解析依赖于材料反射系数的差异响应。采集路径规划需控制天线间距与行进速度以保障图像连续性，信号处理采用时域滤波与小波压缩提升反射层清晰度，图像特征提取结合主峰定位与纹理量化构建自动识别变量集。该技术路径可拓展至高变异区域的病害重构与三维结构建模，具备在精密路况评估与智能巡检系统中的集成价值。

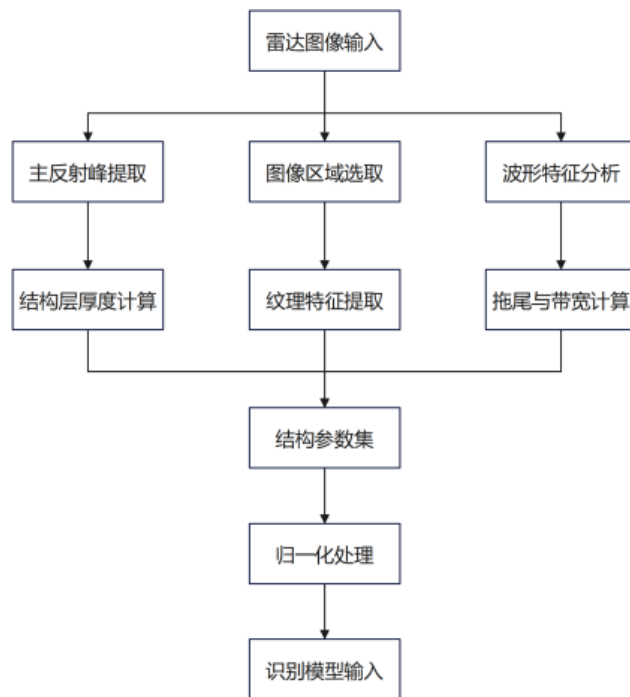


图1 雷达图像结构特征提取与参数生成流程图

参考文献

- [1] 蔡立琼. 探地雷达最小二乘逆时偏移成像技术在道路病害检测中的应用 [J]. 福建地质, 2025, (02): 142-147.
- [2] 王蒙. 基于探地雷达的沥青混凝土道路损伤检测技术 [J]. 中国水泥, 2025, (05): 115-117.
- [3] 曾威, 宋胜, 臧玉龙. 地质雷达技术在道路地下灾害综合检测与风险评估中的应用 [J]. 电子技术, 2025, (03): 36-38.
- [4] 马永建. 基于探地雷达的道路隐性病害与地下管道无损检测技术 [D]. 吉林大学, 2024.
- [5] 徐立. 探地雷达道路检测数据处理及异常目标提取技术研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2023.
- [6] 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.
- [7] 曾雄鹰, 王佳龙, 梁晓东, 等. 基于双频高动态探地雷达技术的道路地下病害检测研究 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37 (05): 2225-2232.