

高速公路路基路面探地雷达检测技术规程

Technical Code of Ground Penetrating Radar Detection for Highway
Subgrade and Pavement

2025 - 04 - 11 发布

2025 - 07 - 10 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 探地雷达检测系统 1

5 检测工作准备 3

6 检测数据采集 3

7 数据处理与解析 4

8 报告编制 6

附录 A （资料性）检测记录表..... 7

附录 B （资料性）典型病害回波特征实例..... 9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对本文件的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会（SXS/TC37）归口。

本文件起草单位：山西省智慧交通研究院有限公司、山西省交通科技研发有限公司。

本文件主要起草人：周丽军、周晓旭、吴宏涛、郭俊凯、吕永萍、孟利强、李元军、刘志华、孔繁盛。

高速公路路基路面探地雷达检测技术规程

1 范围

本文件规定了高速公路路基路面探地雷达检测系统、检测工作准备、检测数据采集、数据处理与解析、报告编制。

本文件适用于车载式探地雷达进行高速公路路基路面层间厚度和内部病害的检测，其他等级公路，混凝土内埋钢筋、地下管线等检测参照进行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- JTG/T 3222 公路工程物探规程
- JTG 3450 公路路基路面现场测试规程
- JTG H30 公路养护安全作业规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

阵列雷达 **array radar**

在特定的雷达天线组合下将相同频率或不同频率的天线阵列组合成一个具备多功能的雷达装置。

3.2

雷达中心频率 **radar center frequency**

雷达天线通频带之间频率的算术平均值。

3.3

时间窗 **time window**

决定雷达系统对反射波信号取样的最大时间范围。

4 探地雷达检测系统

4.1 一般要求

探地雷达检测系统（以下简称“系统”）应满足以下要求：

- a) 系统应具有产品合格证书，并在其检定校准有效期限内使用；
- b) 系统的模/数（A/D）转换器不应低于 16 位；
- c) 系统应具备足够的存储空间存储采集数据；
- d) 系统应配备摄像头同步采集场景信息；
- e) 系统应配备定位装置；
- f) 车载系统应配备测距装置；

- g) 车载系统扫描速率应不低于 800 扫每秒；
- h) 车载系统供电装置的连续工作时间不应少于 7 h；
- i) 探地雷达采集软件应具备采集过程中实时显示数据功能。

4.2 采集参数选取

4.2.1 雷达中心频率选取

4.2.1.1 雷达中心频率选取应结合实际探测深度与分辨率需求，常用探地雷达探测深度对应的中心频率应按表 1 选取。

表1 探地雷达探测深度与中心频率对应关系

有效探测深度 m	中心频率 MHz
0.8	2000
1.0	1600
1.2	1000
1.5	800
4.0	400
8.0	200

4.2.1.2 双频系统的雷达中心频率应高频与低频组合，常用双频系统探测有效深度对应的组合频率应按表 2 选取。

表2 双频探地雷达探测有效深度与组合频率对应关系

有效探测深度 m		组合频率 MHz		用途
高频	低频	高频	低频	
3	8	600	200	地质勘察、路基病害探测、管线探测等
1.5	4	800	400	路基病害探测、路面病害探测、管线探测等

4.2.2 采集时间窗选取

采集时间窗按公式（1）计算：

$$T = w \frac{2 \times H}{v} \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 T ——时间窗长度，单位为秒（s）；
 w ——加权系数，通常取2~2.5；
 H ——目标深度，单位为米（m）；
 v ——电磁波在路基路面中传播的速度，单位为米每秒（m/s），其中 v 按公式（2）计算：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 c ——电磁波在空气中的传播速度，单位为米每秒（m/s）；

ε ——介质的相对介电常数，常见介质的相对介电常数见表3。

表3 常见介质的相对介电常数

介质	相对介电常数 ε
花岗石	4
石灰岩	7
大理石	6
砂岩	4
土壤（干）	4（3~5）
混凝土	6.4
沥青	3~5
水	81
雪（干）	2~3
雪（湿）	4~12
冰	3.2
空气	1
PVC（聚氯乙烯）	3

5 检测工作准备

5.1 前期资料调查

检测前应对待检测区域进行资料调查，调查内容应包括以下部分：

- a) 待检测区域勘察设计文件、交竣工文件、道路结构、道路材料等相关资料调查；
- b) 待检测区域历史养护与维修等相关信息调查；
- c) 与检测工作有关的其他资料调查。

5.2 检测环境要求

检测的环境要求应包括以下内容：

- a) 待检测区域表面应无障碍物，无明显坑槽与凸起；
- b) 待检测区域表面宜干燥，无明显积水、无降雨降雪；
- c) 检测环境温度不应低于-20℃；
- d) 检测系统在使用过程中应避免潮湿、剧烈振动或撞击；
- e) 应避免在强电磁信号区域检测，若无法避免，应及时记录标注强电磁影响区域。

5.3 安全措施

检测过程中的安全措施应包括以下内容：

- a) 探地雷达系统在运行过程中，操作人员应背离天线直接辐射区域；
- b) 使用探地雷达系统在高速公路养护作业时，其安全防护应符合 JTG H30 的要求。

6 检测数据采集

6.1 标定

- 6.1.1 调节探地雷达离地面高度，一般雷达底面离地面高度应以 0.1 m~0.2 m 为宜。
- 6.1.2 标定地面反射波起始零点并在采集软件中记录时间零点。
- 6.1.3 标定测距轮，标定距离不应小于 10 m。

6.2 设置采集参数

设置采集参数包含以下内容：

- a) 连接采集软件与探地雷达系统，可采用无线连接方式、有线连接方式；
- b) 选择探地雷达采集软件的天线中心频率与采集模式；
- c) 在探地雷达采集软件的采集模式中设置采集间隔或采样率；
- d) 设置探地雷达采集软件的采集时间窗、增益、滤波器参数；
- e) 设置采集软件中摄像头的拍摄方位与视频帧数；
- f) 设置待保存的文件夹和文件名。

6.3 采集要求

- 6.3.1 检测系统的探地雷达、摄像头、定位装置与测距装置应同时触发同步采集。
- 6.3.2 数据采集除应符合 JTG/T 3222 的规定外，还应保持车辆在同一车道线匀速行驶，应实时显示探地雷达数据，应对探地雷达采集数据中关注的桩号、病害、构造物等及时进行标签标记。
- 6.3.3 单频/双频探地雷达检测时，应根据需求对检测区域进行测线加密检测。
- 6.3.4 应采用钻孔取芯、弯沉检测、勘察等方式进行验证，钻孔取芯方式应符合 JTG 3450 的要求，验证过程中的安全防护应符合 JTG H30 的要求。
- 6.3.5 可采用附录 A 记录检测信息。

7 数据处理与解析

7.1 数据处理流程

系统检测数据处理流程图见图1。

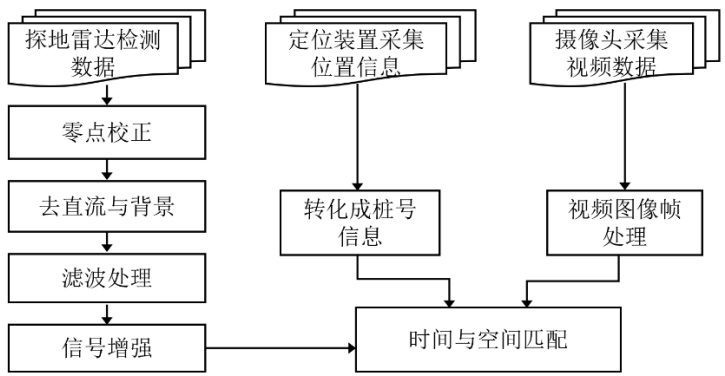


图1 系统检测数据处理流程图

7.2 厚度检测数据解析

7.2.1 根据高速公路路基路面铺设材料的相对介电常数与雷达回波数据中的双程时间估算第 i 层第 j 个采样点处的厚度值应按公式 (3) 计算：

$$d_{ij} = \frac{ct_{ij}}{2\sqrt{\epsilon_{ij}}} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- d_{ij} ——公路路基路面第*i*层第*j*个采样点处估计的厚度, 单位为米 (m);
- t_{ij} ——电磁波在第*j*个采样点处第*i*层材料中的双程时间, 单位为秒 (s);
- ε_{ij} ——公路路基路面第*i*层第*j*个采样点处材料的相对介电常数;
- c ——电磁波在空气中的传播速度, 单位为米每秒 (m/s)。

7.2.2 在第*i*层取*N*个采样点, 将这*N*个采样点的算术平均值定义为第*i*层的平均厚度 $\bar{d}_i$, 平均厚度应按公式 (4) 计算:

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{j=1}^N d_{ij}}{N} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- $\bar{d}_i$ ——公路路基路面第*i*层的平均厚度, 单位为米 (m);
- d_{ij} ——公路路基路面第*i*层第*j*个采样点处估计的厚度, 单位为米 (m);
- N ——在公路路基路面取的采样点个数。

7.2.3 第*i*层平均厚度的标准差 s_i 应按公式 (5) 计算:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (d_{ij} - \bar{d}_i)^2}{N-1}} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- s_i ——第*i*层平均厚度的标准差, 单位为米 (m);
- d_{ij} ——公路路基路面第*i*层第*j*个采样点处估计的厚度, 单位为米 (m);
- $\bar{d}_i$ ——公路路基路面第*i*层的平均厚度, 单位为米 (m);
- N ——在公路路基路面取的采样点个数。

7.2.4 计算变异系数 c_v^i 对第*i*层厚度估计结果进行评估, 变异系数应按公式 (6) 计算:

$$c_v^i = \frac{s_i}{\bar{d}_i} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- c_v^i ——第*i*层厚度估计的变异系数;
- s_i ——第*i*层平均厚度的标准差, 单位为米 (m);
- $\bar{d}_i$ ——公路路基路面第*i*层的平均厚度, 单位为米 (m)。

7.2.5 当路基路面第*i*层的变异系数小于 10% 时, 可判定检测结果的均匀性较好; 当变异系数大于 10% 时, 可判定检测结果的均匀性较差。

7.3 病害检测数据解析

- 7.3.1 单频雷达加密测线检测时, 应结合邻道数据进行关联性解析。
- 7.3.2 双频雷达检测时, 应通过同一位置的不同频率检测数据进行对比与补充性分析识别病害。
- 7.3.3 阵列雷达检测时, 应对各阵列模块接收数据进行相关性分析识别病害。
- 7.3.4 高速公路路基与路面的隐性病害探地雷达回波特征应按照表 4 进行解释分析, 回波特征图形与验证图参照附录 B。

表4 高速公路路基路面隐性病害探地雷达回波特征表

病害类型	回波特征	振幅	相位	频谱
空洞	截面为类圆形空洞回波表现为开口向下的抛物线形态; 截面为类	振幅较强	顶部反射波与入射波同向, 底部反射波与入射波反向	频率高于背景频率

病害类型	回波特征	振幅	相位	频谱
	方形空洞回波表现为连续平板状形态；绕射波较明显			
层间脱空	回波表现为连续平板状形态；多次波较明显，绕射波较明显	振幅较强	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向	频率略高于背景频率
松散	回波顶部形成连续反射波形态，内部波形结构较为杂乱，同相轴比较不连续，多次波不明显，绕射波不明显	振幅较强	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向	频率高于背景频率
隐性裂缝	回波呈现开口向下的抛物线形态，有间断，衰减较慢	波形顶端振幅较强	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向	频率高于背景频率
沉降	回波呈现同相轴向下凹陷形态，绕射波不明显	振幅较强	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向	频率高于背景频率

7.3.5 高速公路路基路面隐性病害探地雷达回波数据解析除应符合 JTG/T 3222 的规定外，还应与其路面视频图像数据、弯沉检测数据等进行关联分析，弯沉检测数据处理应符合 JTG 3450 的要求。

8 报告编制

8.1 报告编制应客观真实、结论明确、图表齐全，报告附图应清晰直观、配置合理。

8.2 报告编制包含但不限于以下内容：

- a) 项目概况；
- b) 检测依据；
- c) 检测设备与工作原理；
- d) 现场检测方案；
- e) 数据解析与检测结果；
- f) 报告附图；
- g) 检测记录表。

附 录 A
(资料性)
检测记录表

表A. 1规定了探地雷达检测路基路面层间厚度的检测记录表。

表A. 1 层间厚度检测记录表

工程名称							路段名称							检测日期					
上、下行							车道							测线编号					
检测依据																			
检测仪器																			
序号	起讫桩号	设计厚度值 (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	标准差	变异系数	验证值	备注		
示意图																			
校对：							检测：							记录：					

表A. 2规定了探地雷达检测路基路面内部病害的检测信息卡。

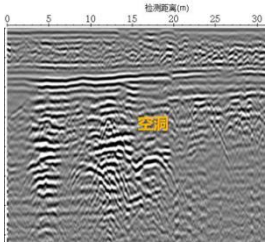
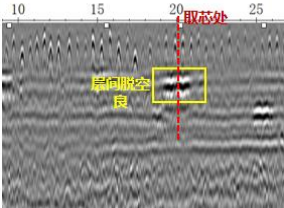
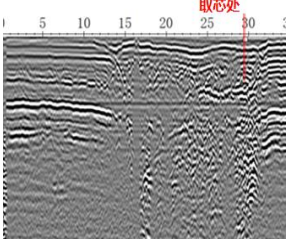
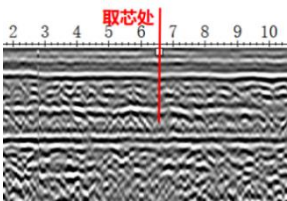
表A. 2 路基路面病害检测信息卡

工程名称			检测日期		
路段名称			测线编号		
病害编号			中心位置	上、下行	
病害类别				车道	
长度（m）				经、纬度	
深度（m）				桩号	
雷达图像			电子地图		
现场环境照片			验证照片		
检测结果					
校对：		检测：		记录：	

附 录 B
(资料性)
典型病害回波特征实例

高速公路路基路面典型病害的回波特征图像与验证实例参见表B. 1。

表B. 1 典型病害回波特征实例

病害类型	回波特征	探地雷达回波图像	取芯验证结果图
空洞	截面为类圆形空洞回波表现为开口向下的抛物线形态;截面为类方形空洞回波表现为连续平板形态;绕射波较明显		
层间脱空	回波表现为连续平板形态;多次波较明显,绕射波较明显		
松散	回波顶部形成连续反射波形态,内部波形结构较为杂乱,同相轴比较不连续,多次波不明显,绕射波不明显		
隐性裂缝	回波呈现开口向下的抛物线形态,有间断,衰减较慢		
沉降	回波呈现同相轴向下凹陷形态,绕射波不明显	