

ICS: 93.080.99
CCS: R18

DB

湖北省地方标准

DB XX XXXXX—XXXX

公路沥青路面隐藏病害探地雷达检测技术 规程

Technical Specification for Ground Penetrating Radar Detection of Hidden Diseases
of Highway Asphalt Pavement

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

草案版次选择

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

地方标准发布部门 发布

目次

目次.....	I
前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和符号.....	2
4 探地雷达检测原理.....	5
5 设备及要求.....	6
6 准备工作.....	8
7 现场检测.....	9
8 病害的解译、验证与处置建议.....	12
9 检测成果.....	18
10 沥青混合料介电常数的工程应用.....	19
11 附录 A：公路材料相对介电常数标定.....	22
12 附录 B：探地雷达现场标定记录表.....	25
13 附录 C：常见公路材料的相对介电常数及电磁波传播速度.....	26
14 附录 D：路面隐藏病害探地雷达检测表.....	27
15 附录 E：雷达图像生成原理.....	28
16 附录 F：路面隐藏病害探地雷达检测信息汇总表.....	29
参考文献.....	30

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。本文件共 10 章、6 个附录，主要内容包括：公路沥青路面隐藏病害探地雷达检测技术的术语和符号、检测原理、设备及要求、准备工作、现场检测、病害解译、检测成果等。

本文件是在总结我国多条沥青路面建设的基础上进行编制，旨在规范湖北省探地雷达检测路面隐藏病害技术。

本文件实施过程中，请专家与学者将发现的问题、建议反馈至武汉理工大学（地址：湖北省武汉市武昌区和平大道 1178 号；联系电话：027-86537997；电子邮箱：zeyu.zhang@whut.edu.cn），供修订时参考。

本文件所涉及的专利技术为武汉理工大学所有，使用授权许可，应与之联系。应识别出的专利为：

- [1] 基于路面使用性能和结构性能的路面综合性能评价方法（专利授权号：ZL202210018038.6）
- [2] 一种基于 MATLAB 的二维探地雷达三维成像方法（专利授权号：ZL201910740238.0）
- [3] 一种基于主成分分析法的沥青路面历史养护效益量化评价方法（专利授权号：ZL201911187531.5）
- [4] 一种基于雷达无损检测的路面空洞含水率计算方法及装置（专利授权号：ZL202011215397.8）
- [5] 沥青混合料的介电等效转换方法、系统、设备及介质（专利授权号：ZL202110831108.5）
- [6] 一种 GPR 图像正演技术路面反射裂缝深度发展模拟方法（专利授权号：ZL202010849699.4）
- [7] 一种基于探地雷达和 FWD 联合检测的裂缝病害评价方法（专利授权号：ZL201910740942.6）
- [8] 一种对大尺寸不均匀混合料介电常数的无损检测方法（专利授权号：ZL201810617112.X）

[9] 基于沥青混合料介电特性的沥青含量无损检测方法（专利授权号：
ZL201810879841.2）

[10] 基于沥青混合料介电模型的道路沉陷病害图像解译方法（专利授权号：
ZL201910740231.9）

本文件的某些内容涉及专利，经专利权人或专利申请人同意，本文件的发布机构不承担识别与保护专利的责任。

本文件由武汉理工大学提出。

本文件由湖北省交通运输厅归口。

本文件起草单位：武汉理工大学、中国公路工程咨询集团有限公司、中咨公路养护检测技术有限公司。

本文件主要起草人：罗蓉、张泽宇、侯芸、杨天宏、姜宏维、陈彧、朱慈祥、黄婷婷、于晓贺、张雪梅、邱胜强、李春辉。

公路沥青路面隐藏病害探地雷达检测技术规程

1 范围

本规程规定了公路沥青路面隐藏病害探地雷达检测的技术和方法，主要包括：术语和符号、检测原理、设备及要求、准备工作、现场检测、检测成果等内容。

本规程适用于以探地雷达对公路沥青路面的面层、基层、路基等结构层的隐藏病害进行检测，公路工程其它部位雷达检测可参照本规程执行。不涉及桥面铺装工程 and 水泥混凝土路面工程的检测。

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。

GB/T 321	优先数和优先数系
GB/T 3101	有关量、单位和符号的一般原则
GB/T 3102.3	量和单位
GB/T 14559	变化量的符号 和单位
GB/T 15834	标点符号用法
GB/T 15835	出版物上数字用法
GB/T 7714	信息与文献参考文献著录规则
GB/T 20000.1-2004	标准化工作指南
GB/T 20001.7-2017	标准编写规则
JTG D50-2017	公路沥青路面设计规范
JTG F40-2004	公路沥青路面施工技术规范
JTG E20-2011	公路工程沥青及沥青混合料试验规程
JTG E42-2005	公路工程集料试验规程
JTG 5210 2018	公路技术状况评定标准
JTG 124-2023	公路断面探伤及结构层厚度探地雷达检定规程
HBHCSGCSG	湖北省高速公路建设标准化指南（路面工程）

3 术语和符号

下列术语和符号适用于本文件。

3.1 术语

3.1.1 探地雷达 Ground Penetrating Radar

是探地雷达系统的简称，通常由发射天线、接收天线，以及控制收发和数据存储的控制系统等等硬件和软件组成。根据探测方式的不同，可将探地雷达分为地面耦合式（简称地耦式）和空气耦合式（简称空耦式），本规范主要针对空耦式探地雷达进行介绍。

3.1.2 探地雷达天线 Radar Antenna

探地雷达发射和接收电磁波的装置，分为发射天线及接收天线。

3.1.3 隐藏病害 Hidden Diseases

是指那些在路面上无法直接观察到，或者初期症状不明显，但随着时间和荷载作用逐渐加剧，最终可能对路面结构性能和行车安全产生严重影响的各种损伤或劣化现象。例如：隐藏裂缝、空洞、沉陷、松散、层间黏结不足、基层脱空等。本规范主要针对松散、脱空、沉陷进行介绍。

3.1.4 分辨率 Resolution

是指探地雷达能够分辨地下最小异常体的能力，包括水平分辨率和深度分辨率。水平分辨率是指探地雷达系统在同一深度层面上能分辨出水平方向上最小异常体尺寸的能力；深度分辨率是指探地雷达系统在垂直方向上能够区分一个以上反射截面的能力。

3.1.5 介电常数 Dielectric Constant

也称为绝对介电常数或电容率，表示物质在外加电场作用下储存电荷的能力度量。

3.1.6 相对介电常数 Relative Dielectric Constant

介质相对于真空的介电常数，即介质介电常数与真空中的介电常数的比值，以字母 ϵ_r 表示，但也通常简称为介电常数。一般来说，相对介电常数越大，雷达波在介质中的传播速度越慢，同时能量衰减也越快，这直接影响到探地雷达探测的深度和分辨率。

3.1.7 中心频率 Central Frequency

是指探地雷达系统发射电磁波的中心频率成分，它决定了雷达波的穿透深度和分辨率。

3.1.8 时窗长度 Time Window

是指从采集第一个数据开始到采集最后一个数据结束期间的长度。

3.1.9 测距轮 Distance Measurement Instrument

一种通过转动来测量距离的装置，每转动一圈产生固定的脉冲数，实际测距时，根据脉冲数和测量轮的周长可以确定距离。

3.1.10 增益 Gain

对探地雷达波信号进行放大或补偿的处理方法。

3.1.11 A/D 转换位数 Analog-to-Digital Converter

是指将模拟信号转换为数字信号时所使用的二进制位数。常见的 A/D 转换位数有 8 位、10 位、12 位、16 位等，位数越高，转换精度和分辨率越高，能够更准确地表示模拟信号的幅度或大小。

3.1.12 扫描速率 Scan Rate

或称扫描率，是指雷达系统在进行地下探测时，探测设备在单位时间内扫描或采集地下介质的数据量。

3.1.13 距离标定误差 Range Calibration Error

是指探地雷达设备在测量地下目标时所产生的距离测量误差。

3.1.14 时基精度 Time Base Accuracy

是指雷达系统中用于测量信号到达时间或信号持续时间的精度。

3.1.15 信噪比 Signal-Noise-Ratio

是指探地雷达有效信号功率与干扰信号（噪声）功率之比。

3.1.16 复合材料介电模型

是一种描述和预测复合材料在电磁场作用下表现出的电性能（如介电常数、损耗因子等）的理论框架。

3.1.17 带宽 Bandwidth

是指其发射和接收电磁波信号的有效频率范围。

3.1.18 A-scan 数据 A-scan Data

是指雷达信号在一个单一探测点上获取的时间域回波信息。

3.1.19 B-scan 数据 B-scan Data

是指在二维平面上展示的一系列连续 A-scan 数据的集合。

3.1.20 短期信号稳定性 short term stability, STS

是指探地雷达以金属板做全反射试验，并以最快采样速度记录的 200 个波形中，最大波幅与最小波幅的差与平均波幅的比。

3.1.21 长期信号稳定性 long term stability, LTS

是指探地雷达以金属板做全反射试验，并以 0.5 个/min 的采样速度记录的 60 个波形中最大波幅与预热后测得的第一个波幅的差与预热后测得的第一个波幅之比。

3.1.22 地面波 Ground Wave

地面波是空气和地面的分界线。

3.1.23 道间距 Track Spacing

相邻两条雷达剖面（或称“道”、“扫描线”）之间的水平距离。

3.1.24 扫描间距 Scanning Spacing

单位距离内扫描次数，为道间距互为倒数。

3.2 符号

A_p : 金属板反射波振幅；

A_r : 公路面层反射波振幅；

a : 时窗长度加权系数，一般取 1.3~1.5 之间，目标深度越小，加权系数越大；

c : 为光速，等于 3×10^8 m/s；

d : 标定目标厚度，m；

d_{\max} : 最大探测深度，m；

f : 测试频率, Hz;

f_0 : 初始频率, Hz;

f_c : 天线中心频率, Hz;

x_{01} : T_1 与 R_1 间的距离;

x_{02} : T_2 与 R_2 间的距离;

x_1 : 雷达发射-接收天线对 T_1R_1 信号传播至公路结构层表面时的距离;

x_2 : 雷达发射-接收天线对 T_2R_2 信号传播至公路结构层表面时的距离;

R : 电磁波在不同介质界面的反射系数;

r : 沥青混合料试件的半径, cm;

S : 采样率;

t : 电磁波的双程走时, ns;

V_a : 空气的体积, cm^3 ;

v : 电磁波在介质中的传播速度, m/ns;

ΔT : 时窗长度, ns;

ϵ_a : 空气的介电常数, F/m

ϵ_{ac} : 沥青混合料的介电常数, F/m;

ϵ_b : 沥青的介电常数, F/m;

ϵ_r : 相对介电常数, 无量纲;

ϵ_s : 集料的介电常数, F/m;

P_b : 沥青含量, %;

G_b : 沥青的密度, g/cm^3 ;

G_s : 集料的密度, g/cm^3 ;

G_{se} : 集料的毛体积相对密度, g/cm^3 ;

G_{mm} : 沥青混合料密度, g/cm^3 ;

G_{mb} : 沥青混合料毛体积相对密度, g/cm^3 ;

4 探地雷达检测原理

探地雷达的检测原理是基于电磁波在介电常数差异较大的介质中传播时产生反射和折射特性, 如图 1 所示。首先, 发射天线向地下发射高频电磁波; 然后, 电磁波在相对介电

常数存在差异的沥青路面各结构层以及病害位置会发生透射和反射；接着，接收天线接收到地下介质反射回来的电磁波信号；最后，信号处理装置根据接收到电磁波的电压、振幅强度以及时间的变化，并绘制雷达图像。通过分析雷达图像的形貌特征，即可推断出隐形病害的类型、位置、大小等信息。但需注意，天线中心频率的选择要兼顾目标深度、目标最小尺寸、分辨率以及天线尺寸是否符合场地需要。

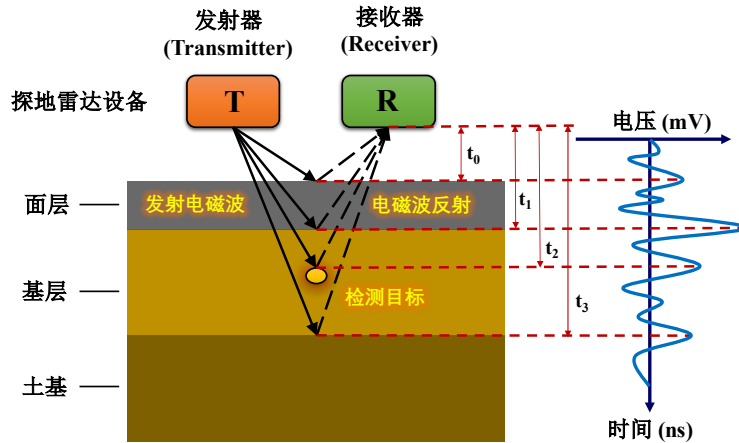


图 1 探地雷达无损检测基本原理图

5 设备及要求

5.1 探地雷达系统

探地雷达系统包括硬件和软件两大部分。

5.1.1 硬件部分

探地雷达系统的硬件组成通常包括以下几个核心设备：

a) 主机（主控单元）：作为系统的核心，负责控制整个系统的运行，包括信号生成、数据采集、参数设置以及与外部设备的通信。

b) 发射机：发射机根据主机发送的指令产生高频脉冲电磁波，这些脉冲通过天线向下发射到地下介质中。

c) 发射天线：专门设计用于将电信号转换为电磁波并向地下传播的装置。发射天线通常是宽频带的，以适应不同的地下探测需求。

d) 接收机：接收机捕捉从地下反射回来的电磁波，并将其转换回电信号。

e) 接收天线：与发射天线相配合，接收来自地下目标或结构反射回来的电磁波信号。

f) 摄像装置：记录检测路线的影像资料。

g) 雷达配件：如定位系统（GPS、测距轮或其他定位装置）、电缆连接器、金属板、雷达安装连接杆（推荐使用木制或塑料材质，禁止使用金属材料）以及其他辅助工具，用于确保雷达系统在现场能够稳定、准确地工作。

h) 电源：为探地雷达系统供电，可由蓄电池或车载电源提供。

i) 运载工具：空耦探地雷达通常需要使用小型汽车承运上述装置，并安置于适当位置保证检测质量。

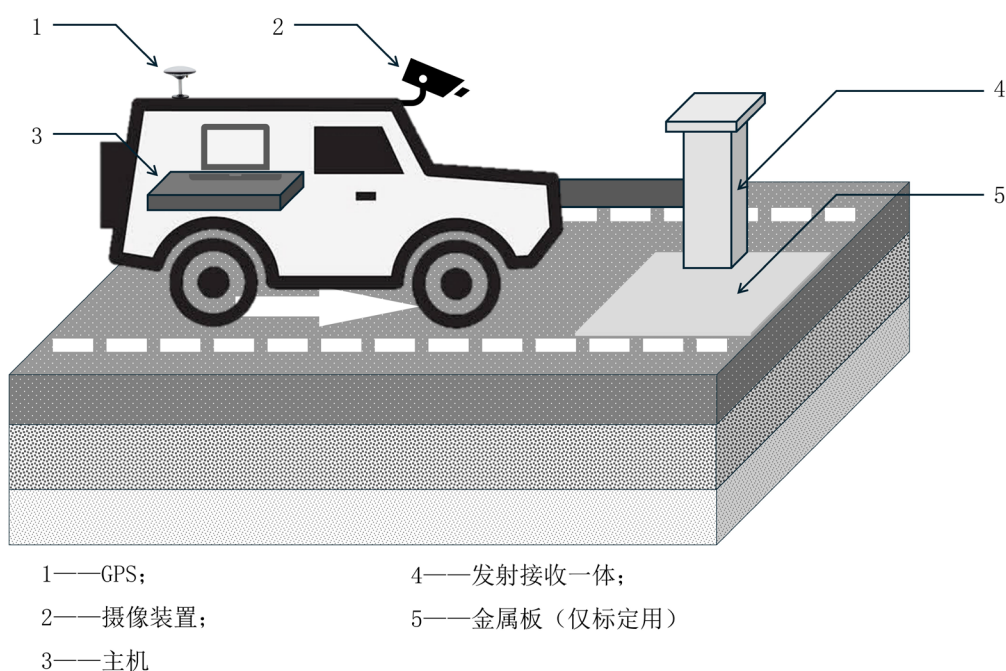


图 2 雷达系统组件

5.1.2 软件部分

软件包括：

a) 数据采集软件：安装于探地雷达主机内，用于设置探地雷达的检测参数；

b) 数据处理软件：安装于公用或私人计算机内，用于处理采集的探地雷达数据，最终呈现为易于解读的图像或数据报表。

5.2 探地雷达系统硬件性能要求

在设计探地雷达系统时，应根据其应用背景选择合适的信号形式、发射功率、探测方式和硬件实现，从而实现系统的最优设计。

探地雷达技术性能指标及要求应符合表 1 的规定。

表 1 探地雷达性能要求

参数类别	技术性能指标	技术要求
系统性能	A/D 转换位数	≥16bit
	扫描速率	≥300 线/s
	距离标定误差	≤0.1%
	时窗长度	0~1024ns (可选)
	时基精度	≤0.02%
	采样率	≤0.5ns
技术性能	信噪比	≥120dB 或 ≤4.5%
	短期信号稳定性	≤1.0%
	长期信号稳定性	≤3.0%
	外壳防护等级	≥IP54

6 准备工作

6.1 检测流程

公路沥青路面隐藏病害的探地雷达检测流程如图 3 所示，主要包括以下内容：准备工作、现场检测与图像解译、递交检测成果。

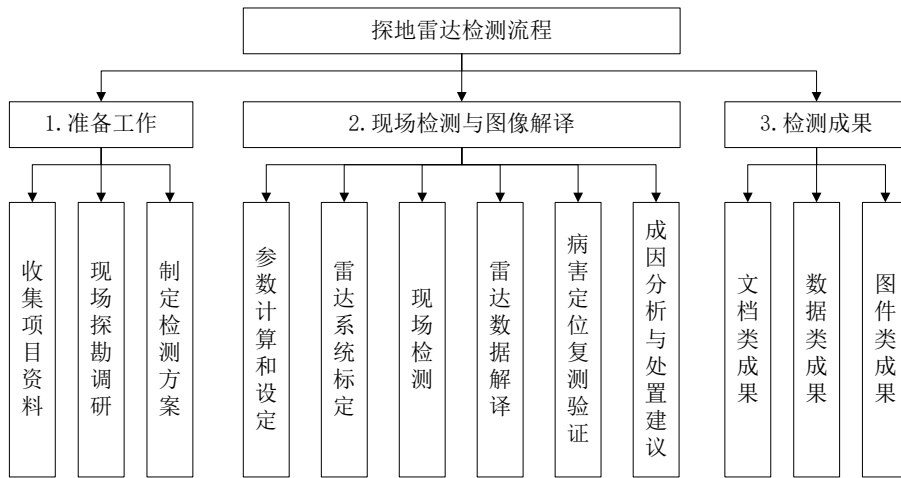


图 3 探地雷达检测流程图

6.2 收集项目资料

为安全、准确、快速地完成探地雷达检测工作，需提前收集相关项目资料，并充分了解检测对象的工程概况，以制定合适的检测方案。一般包括但不限于以下资料：

a) 路基路面结构及级配文件：道路工程的路面结构、路面材料、矿料级配等设计和施工资料。尤其需注意沥青混凝土内掺有金属改性成分（如钢渣）时，将会增大检测误差；

- b) 地下管线资料：各类地下工程的设计和施工资料；
- c) 工程地质文件：检测区内岩土工程、工程地质和水文地质勘察资料；
- d) 历史养护维修资料：检测区内过往的道路养护、维修的设计和施工资料；
- e) 测绘资料：检测区内的地形图和测量控制点资料；
- f) 磁场分布资料：检测区域内的典型干扰磁场分布。
- g) 其他补充性文件。

6.3 现场踏勘调研

为进一步掌握测区内的工程概况，需对测区进行至少一次现场踏勘工作，为制定检测方案收集资料。现场踏勘主要包括如下调研内容：

- a) 校核已收集的6.2节当中工程资料的完备性与可利用程度，包括：地形地貌、路基路面结构、地下工程、养护维修现场、测量控制点等；
- b) 评估现场作业条件及风险，对关键路段做好记录；
- c) 关注桥梁和隧道路段的起讫桩号、路面结构；
- d) 记录测区内有一切可能的干扰因素；
- e) 形成初步测线布置方案和检测方案。

7 现场检测

7.1 检测环境要求

检测环境应符合以下要求：

- a) 检测前，需关注检测区域内当日及前三天的天气状况。探地雷达检测适宜于晴朗天气进行，空气相对湿度适宜小于85%。
- b) 须避免在雨天或雨过天晴的时刻进行检测。
- c) 须避免测线线内存在路面积水。若不可避免，应及时记录。
- d) 须避免强电磁信号区域。若无法避免，应标注强电磁影响区域。

7.2 探地雷达测量参数的设定

检测参数设定应能满足项目检测要求，并达到最佳检测效果。雷达参数通常包括：天线中心频率、时窗长度、采样率、相邻扫描点间距等。

7.2.1 天线中心频率

在满足探测深度的前提下，综合考虑检测场地及环境要求，使用较高频率的天线。

a) 根据探测深度和精度确定，可按下式计算：

$$f_c = \frac{c}{2\Delta d\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \text{式 1}$$

式中： f_c ——天线中心频率（Hz）；

c ——光速，等于 3×10^8 m/s；

Δd ——垂直分辨率，可取 1/4 波长（m）；

ε_r ——公路结构层的相对介电常数，取值范围可参见附录 C。

b) 当相对介电常数不宜确定时，探测深度与天线中心频率的关系可以参照表 2 执行。

表 2 天线参数选定

天线中心频率	探测深度
2.5 GHz	0.3 m ~ 0.6 m
1.0 GHz	0.6 m ~ 1.0 m
0.9 GHz	0.75 m ~ 1.5m
0.5 GHz	1.5m ~ 3.0m
0.3 GHz	3.0m ~ 6.0m
0.1 GHz	10.0m ~ 20.0m

7.2.2 时窗长度

时窗长度 ΔT 可由下式估算：

$$\Delta T = a \cdot \frac{2d_{max}}{v} = a \cdot \frac{2d_{max}\sqrt{\varepsilon_r}}{c} \quad \text{式 2}$$

式中： ΔT ——时窗长度（ns）；

a ——时窗长度加权系数，一般取 1.3~1.5 之间，目标深度越小，加权系数越大；

d_{max} ——最大探测深度（m）；

v ——探地雷达电磁波传播速度（m/s）；

c ——光速，等于 3×10^8 m/s；

ε_r ——公路结构层的相对介电常数，取值范围可参见附录 C。

为保证路面结构层差异及目标分辨率，检测过程中通常需将式 2 计算值增加 30%，公路沥青路面探地雷达检测的时窗长度可参照表 3 执行。

表 3 时窗长度的选择

探测深度	时窗长度
0.3 m ~ 0.6 m	6ns ~ 18ns
0.6 m ~ 1.0 m	12ns ~ 30ns
0.75 m ~ 1.5m	15ns ~ 45ns
1.5m ~ 3.0m	30ns ~ 90ns
3.0m ~ 6.0m	60ns ~ 180ns
10.0m ~ 20.0m	200ns ~ 600ns

7.2.3 道间距

距离模式下的探地雷达检测参数。可根据车辆型号、编码器规格、目标大小、目标深度等选择合适的道间距，控制检测速度，一般道间距可选择 3cm~10cm。

7.3 现场检测程序

7.3.1 主机参数调节

- a) 安装雷达各组件：根据图 2 所示的各部件将雷达天线安装牢固。
- b) 开机预热：检查各组件安装无误后，开机进行充分预热，预热时间不得少于规定的时间（一般约为 15min~20min）。
- c) 设置参数：按照本规范 7.2 节方法设置天线中心频率、时窗长度、采样率、道间距等参数。
- d) 确定地面波：将金属板置于雷达天线下方，寻找地面波；若地面波反射不明显，可在天线下方水平抽动金属板，使其进出雷达天线范围内，以寻找地面波。然后将地面波调至尽量靠屏幕上方但不超出屏幕。
- e) 调节增益：将地下因衰减而反应很弱的信号倍数进行放大。注意调节增益时单道波不能出现矩形波。

7.3.2 雷达系统标定

1. 距离标定

两种方法，其一，通过雷达参数中设置轮胎直径和编码器脉冲数控制距离，该方法可作为检测中简易设置方法，要求轮胎直径测量准确；其二，在平整路面上量取不小于 100m

的距离，通过雷达主机中的距离标定功能让车辆从起点缓慢跑到终点位置，得到距离校正参数，一般将该方法作为距离标定方法。要求距离标定误差 $\leq 0.1\%$ 。

2.路面材料相对介电常数标定

a) 现场检测前，根据附录 A 的标定方法标定公路材料的介电常数。标定方法及相关信息应详细记录于附录 B 的表内。

b) 标定段落长度不宜大于 20 公里，一个段落内至少标定三次金属板或三个芯样，且标定位置应均匀分布，然后取标定段内的平均值作为相对介电常数。当公路结构层的含水率变化较大或路表病害较多时，应适当增加标定点数。

c) 常见公路材料的相对介电常数和电磁波传播速度可参考附录 C。

3.其他标定

空气中雷达波速测量相对误差、中心频率测量相对误差等标定方法可参照交通运输部发布的 JTG 124-2023 《公路断面探伤及结构层厚度探地雷达检定规程》执行。

7.3.3 现场数据采集

现场数据采集应符合下列规定：

a) 采集时间：数据采集时间应综合考虑检测区域内交通流量、天气状况的影响；
b) 雷达系统的移动速度应均匀，且车速不要超过最大允许速度。
c) 应及时记录各类地表积水、金属扣件、减速带、路表坑槽引起跳车等外在因素的影响，必要时进行复测；

d) 在桥梁、隧道等结构物的起始和结束位置打标记，有条件可在整桩号处打标记（目的是避免误差累积，方便定位区间）。后期也可根据 6.2 节收集的项目资料和摄像机记录的现场图像数据进行核实。

e) 当发现疑似路面隐藏病害时，应及时标记位置；
f) 当检测区域局部不满足检测条件时，应记录其位置和范围，待具备检测条件后补测；
g) 数据采集过程中应按本规范附录 D 进行记录；
h) 检测过程中开启双闪警示灯，有条件可配置路政车前后护航，做好安全工作。

8 病害的解译、验证与处置建议

8.1 雷达数据要求

数据处理工作包括雷达检测数据和定位测量数据，应符合下列规定：

- a) 数据处理前，原始数据应完整、可靠、有效，发现问题应重新检测或补测；
- b) 雷达检测数据：雷达检测的原始数据为电磁波反射信号的电压值，需配合雷达厂家的数据处理软件进行操作；
- c) 定位数据：定位数据为 GPS 提供的三维坐标值或测距轮提供的里程值；GPS 坐标需与 6.2 节收集的测区范围内的控制点坐标值相匹配；测距轮记录的里程值需能准确反映雷达车辆行驶里程；
- d) 原始数据应及时归档，保证能够溯源。

8.2 道路病害解译

本规范以 Pavecheck（雷达数据处理软件）生成的雷达图像为例，对公路沥青路面隐藏病害的解译方法进行介绍：

a) 数据处理软件界面：Pavecheck 雷达数据处理软件的界面如图 4 所示，包含雷达检测图像（上方）、同步路表影像（左下方）、A-scan 数据的波形图（右下方）。雷达图像的成像原理参见附录 E。



图 4 Pavecheck 雷达数据处理软件主界面

8.2.1 道路病害解译方法

探地雷达图像解译可从以下三方面进行分析：

1.均匀性：是指探地雷达图像中某一区域内的信号响应是否保持一致或相似，反映的是地下介质的物理性质（如介电常数、电导率、密度等）在该区域内是否没有显著变化。在探地雷达图像上则表现为色块色彩的均匀、连续变化。

2.连续性：是指探地雷达图像中同相轴（即同一反射界面产生的回波起跳点连线）或信号特征是否连续、无间断地延伸，反映出地下界面或结构的连贯性。在探地雷达图像上则表现为色块是否发生水平方向的断开。

3.平整性：是指探地雷达图像中所揭示的地下界面或结构的水平或垂直方向上的形状是否规则、起伏等。在探地雷达图像上则表现为垂直方向色块的波动、阶跃变化。

8.2.2 正常道路

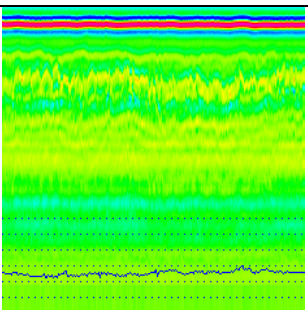
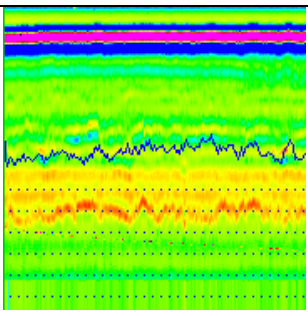
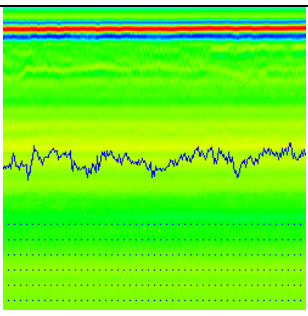
1.正常道路特征

正常道路的纵断面在形貌上表现为层间紧密结合、连续平直、结构层密实，无明显的分层、剥落、断裂、错位或起伏现象。

2.正常道路的雷达图谱

图像的第一道“蓝-红”交界处即为道路表面，利用图像的色谱变化或电磁波行程时间与道路材料的电磁波传播速度即可确定路面各结构层层位。正常道路的雷达图像具有色彩均匀分布、结构层均匀连续，无明显错位、弯曲等特征。正常道路的雷达图谱如表 4 所示。

表 4 正常道路雷达图谱

路段名称	京港澳高速湖北段	昌九高速	汉十高速
雷达图谱			
路面结构	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20I 下面层 6cm AC-20S 基层 30cm 水泥稳定碎石	上面层 4cm SMA-13 中面层 6cm AC-20 下面层 8cm AC-25 基层 20cm 半刚性基层	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20C 下面层 8cm AC-25C 基层 30cm 水泥稳定碎石

8.2.3 松散

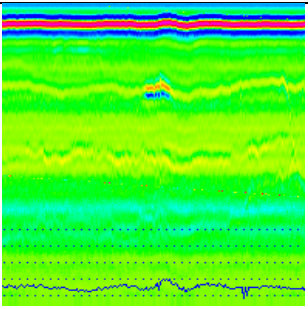
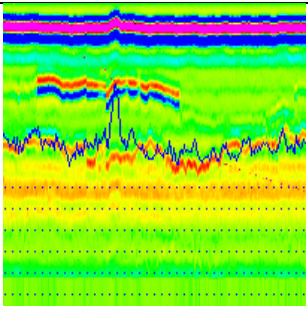
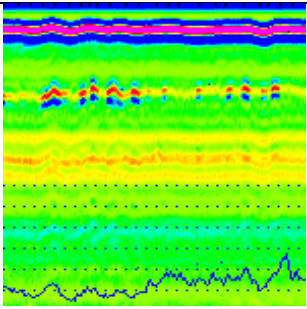
1.松散病害特征

路基路面松散病害在纵断面视角下表现为集料颗粒间出现不同程度的松动、脱落、不紧密、粗糙、颗粒起伏等现象，路面结构层间界面模糊或消失。

2.松散病害的雷达图谱

道路在脱空与松散病害的密度较低、空隙较大，介电常数相较周围正常道路明显偏低。结构层在水平方向上出现“红-蓝”色块，说明结构层之间出现突变区域。松散病害的雷达图像如表 5 所示。

表 5 内部松散、脱空病害雷达图谱

路段名称	京港澳高速湖北段	昌九高速	汉十高速
雷达图谱			
路面结构	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20I 下面层 6cm AC-20S 基层 30cm 水泥稳定碎石	上面层 4cm SMA-13 中面层 6cm AC-20 下面层 8cm AC-25 基层 20cm 半刚性基层	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20C 下面层 8cm AC-25C 基层 30cm 水泥稳定碎石

8.2.4 脱空、空洞

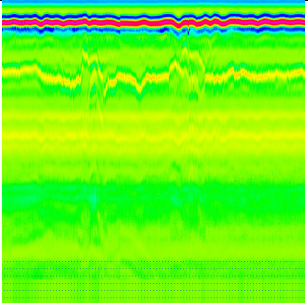
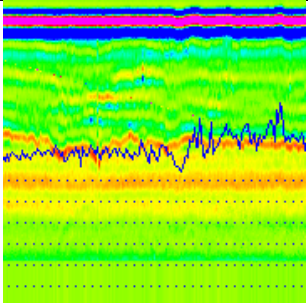
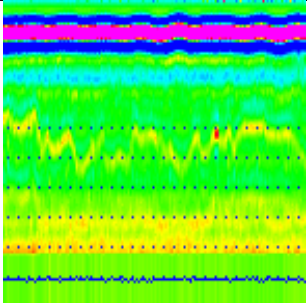
1.脱空、空洞病害特征

脱空指净空在 20cm 以下的空洞，净空大于 20cm 为空洞。路基路面脱空病害在纵断面视角下表现为路面结构层之间失去了原有的接触和黏结，形成了空隙或气囊，也可能伴有轻微的局部凹陷或突起。相较于松散病害，脱空和空洞病害的空隙更大。脱空和空洞病害包括但不限于面层与基层、基层与底基层、底基层与路基之间。

2.脱空、空洞病害的雷达图谱

脱空和空洞病害的雷达图谱为各结构层依然平整，但病害处的色块在水平方向上发生断开现象，但跨过断开区域，各结构层间水平方向依然保持平齐。脱空、空洞病害的雷达图谱如表 6 所示。

表 6 脱空、空洞雷达图谱

路段名称	京港澳高速湖北段	昌九高速	汉十高速
雷达图谱			
路面结构	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20I 下面层 6cm AC-20S 基层 30cm 水泥稳定碎石	上面层 4cm SMA-13 中面层 6cm AC-20 下面层 8cm AC-25 基层 20cm 半刚性基层	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20C 下面层 8cm AC-25C 基层 30cm 水泥稳定碎石

8.2.5 沉陷

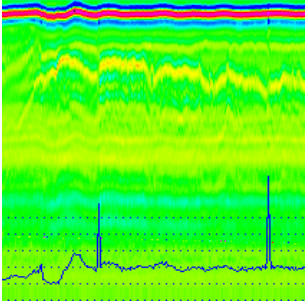
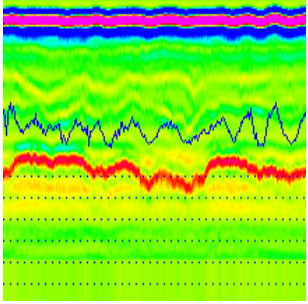
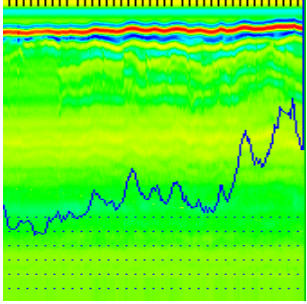
1. 沉陷病害特征

沉陷是路面在车轮作用下表面产生的较大凹陷变形，有时凹陷两侧伴有隆起现象。沉陷病害在纵断面表现为连续或间断的坑洼或波浪形起伏，层间相对位移或分离。同时存在，或可向周围进一步发展为裂缝、积水、脱空、错台等病害，以及材料流失后造成错台路基或基层的空洞等。

2. 沉陷病害的雷达图谱

图谱内出现较大区域色块波动和不连续现象，各结构层在水平方向上出现上下错动，沉陷上方的路表位置处出现不同程度的波动。正常道路的雷达图谱如表 7 所示。

表 7 沉陷病害雷达图谱

路段名称	京港澳高速湖北段	昌九高速	汉十高速
雷达图谱			

路段名称	京港澳高速湖北段	昌九高速	汉十高速
路面结构	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20I 下面层 6cm AC-20S 基层 30cm 水泥稳定碎石	上面层 4cm SMA-13 中面层 6cm AC-20 下面层 8cm AC-25 基层 20cm 半刚性基层	上面层 4cm superpave12.5 中面层 6cm AC-20C 下面层 8cm AC-25C 基层 30cm 水泥稳定碎石

8.3 疑似病害的定位、复测与验证

8.3.1 定位

根据雷达数据解译结果，初步确定道路隐藏病害的路线桩号、病害类型、埋深、严重程度以及现场标注信息等汇总于附录 F 的表内。待下一步复测与验证。

8.3.2 复测

道路隐藏病害的复测应符合下列规定：

- a) 排除初测过程中积水、积雪、杂物的干扰后，可参照初测时的技术方案，对路面隐藏病害的可疑位置进行重点复测；
- b) 复测可采用网格化加密布设测线，测线间距不应大于 1m；
- c) 复测的横向区域应超出可疑区域两条测线，纵向区域应超出可疑区域 5m；
- d) 复测结果汇总于附录 F 的表内。

8.3.3 验证

道路隐藏病害的验证通常包括以下几个方法或步骤：

- a) 历史数据验证：调研检测测线区域是否存在历史检测结果或维修养护记录，若存在相关记录，则可以对比分析检测结果。
- b) 与其他无损检测技术结合验证：条件允许，可结合其他无损检测手段进行验证，例如落锤式弯沉仪、超声波检测等。
- c) 现场取芯直接验证：对可疑位置采用钻芯取样、挖坑检查等方式直接验证。

8.4 成因分析与处置建议

针对确认的道路隐藏病害，可结合外部周围环境、施工工艺、材料质量、地形地貌等多方面的因素对松散、脱空、沉陷等病害的诱发原因进行针对性分析，并给出合理的处置建议。具体方案可参照表 8 执行。

表 8 道路典型隐藏病害诱发原因与处置建议

项目	松散	脱空	沉陷
病害特征	集料与胶结料之间的黏结力减弱，集料颗粒脱落、松动、松散、空隙大。	包含但不限于面层、基层、路基自身或相互之间失去有效接触和黏结，形成空气或水分填充的空隙。	路面及路基在垂直方向发生不可逆的下沉，形成局部凹陷或坑洞。
诱发原因	<ul style="list-style-type: none"> ●沥青老化； ●集料与沥青不兼容； ●施工工艺不当（如压实不足、拌合不均等）； ●长期水损害等。 	<ul style="list-style-type: none"> ●施工压实不足； ●层间黏结材料失效； ●地下水上升； ●温差变化大。 	<ul style="list-style-type: none"> ●地基承载力不足； ●施工质量不佳； ●路基土体压缩； ●排水不畅； ●地下水位变动；
处置建议	<ul style="list-style-type: none"> ●表面铣刨、重新铺筑； ●层间黏结层修复； ●裂缝封闭； ●预防性养护。 	<ul style="list-style-type: none"> ●钻孔灌浆； ●高压喷射注浆； ●路面板抬升及重新固定； ●预防性养护。 	<ul style="list-style-type: none"> ●局部开挖、换填、压实； ●注浆加固、换填改良土； ●处理地基，增强承载力； ●排水改造，预防养护。
相互作用	<pre> graph LR A[裂缝] -- 诱发 --> B[松散] B -- 诱发 --> C[脱空] C -- 诱发 --> D[沉陷] E[温缩、疲劳] -- 加速 --> A F[水侵蚀、施工不当] -- 加速 --> B G[层间黏结不足] -- 加速 --> C H[承载不足] -- 加速 --> D C -- 加速 --> B D -- 加速 --> C I[相互交织、共同作用] </pre>		

9 检测成果

9.1 一般规定

- a) 检测成果应遵循解译正确、科学有据、结论明确的原则。
- b) 检测成果应包括文字报告、成果图件和数据资料。
- c) 报告编写应根据检测项目任务书、设计书及有关标准进行。
- d) 报告附图、附件应清晰明了，目的明确。
- e) 道路塌陷隐患平面分布图应根据塌陷隐患类型采用统一的代号、颜色和图例编制。
- f) 成果解释剖面图绘制应标明塌陷隐患的空间位置、形态及类型。

9.2 检测成果报告内容

检测成果报告包括但不限于原始数据与图像、检测过程与病害分析等核心内容。

9.2.1 原始数据与图像：

- a) 探地雷达设备采集到的原始雷达波信号数据。
- b) 经过处理后生成的二维 B-scan 图像或三维图像。
- c) 现场采集的其他数据与图像。

9.2.2 检测过程、解译分析与汇总报告：

- a) 检测概述：包括检测目的、范围、采用的设备型号、天线频率、道间距、扫描速度等技术参数，以及天气、路面温度等作业环境条件。
- b) 病害统计与分布图：汇总各类病害的数量、总面积、平均深度等统计数据，以及病害在路面空间上的分布图，有助于直观了解病害的集中区域和严重程度分布。
- c) 病害等级评定：依据 JTG 5210 2018《公路技术状况评定标准》或其他相关标准，对检测到的病害进行分级，如轻度、中度、重度，为后续维修决策提供依据。
- d) 诊断与建议：基于检测结果，对病害产生的原因进行初步分析，提出针对性的维修、加固或预防措施建议，可能还包括定期复查或进一步检测的建议。

10 沥青混合料介电常数的工程应用

沥青混合料作为沥青胶结料、粗集料、细集料、纤维等多相材料组成的复合材料，其介电特性受到各组成成份自身及成分间的影响。为提升沥青混合料介电常数的测量或预估精度，本规范引入沥青混合料介电常数关于沥青混合料密度和沥青含量的数学模型，以供相关行业学者或工程师参考。

10.1 计算沥青混合料密度

本规范提出一种基于沥青混合料介电常数反算毛体积相对密度的方法，为探地雷达快速、全面检测路面压实度提供相应的理论参考。沥青混合料的材料组成模型如图 5 所示，则沥青混合料密度关于各组分介电常数的表示式如下式所示：

$$G_{sb} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{ac}} - 1}{\frac{P_b}{G_b} \sqrt{\varepsilon_b} + \frac{1-P_b}{G_{se}} \sqrt{\varepsilon_s} - \frac{1}{G_{mm}}} \quad \text{式 3}$$

式中： G_b ——沥青的密度， g/cm^3 ，测试方法参见 JTG E20-2011；

G_{sb} ——沥青混合料毛体积相对密度， g/cm^3 ，测试方法参见 JTG E20-2011；

G_{se} ——集料的毛体积相对密度， g/cm^3 ，测试方法参见 JTG E42-2005；

P_b ——沥青含量，%，测试方法参见 JTG E20-2011；

ε_b ——沥青的介电常数，F/m，测试方法参见 DIN IEC 247-1996；

ε_s ——集料的介电常数，F/m，测试方法参见 GOST 25495-1982；

ε_{ac} ——沥青混合料的介电常数，F/m，测试方法参见 ASTM A893/A893M-2003(2015)；

G_{mm} ——沥青混合料密度， g/cm^3 ，测试方法参见 JTG E20-2011。

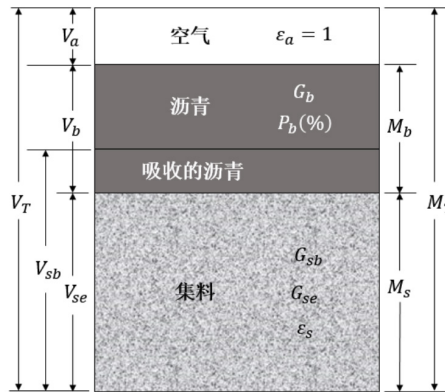


图 5 沥青混合料材料组成模型

10.2 计算沥青含量

沥青含量作为评价沥青路面施工质量的重要指标之一，其对于路面车辙病害的出现与否起到了关键性的作用。结合适用于沥青混合料的介电常数模型和沥青混合料沥青含量的理论公式，通过理论推导与整理，得到沥青混合料沥青含量与其介电常数之间的表达关系：

$$P_b = 100 - \frac{\sqrt{\varepsilon_{ac}} - V_a \sqrt{\varepsilon_a} - (1 - V_a) \sqrt{\varepsilon_b}}{\sqrt{\varepsilon_s} - \sqrt{\varepsilon_b}} \cdot \frac{G_s}{G_{mb}} \quad \text{式 4}$$

式中： G_s ——集料的密度， g/cm^3 ，测试方法参见 JTG E42-2005；

G_{mb} ——沥青混合料毛体积相对密度， g/cm^3 ，测试方法参见 JTG E20-2011；

P_b ——沥青含量，%，测试方法参见 JTG E20-2011；

ε_a ——空气的介电常数， F/m ，测试方法参见 DIN IEC 247-1996；

ε_b ——沥青的介电常数， F/m ，测试方法参见 GB/T 5594.4-2015；

ε_{ac} ——沥青混合料的介电常数， F/m ，测试方法参见 ASTM A893/A893M-2003(2015)；

V_a ——空气的体积， cm^3 ，实测。

11 附录 A：公路材料相对介电常数标定

(规范性附录)

公路材料相对介电常数标定

11.1 金属薄板法

a) 将探地雷达系统的各组件按照图 2 方式连接并预热。将探地雷达设备厂商配套的金属板放置于探地雷达天线正下方的待测路面，设定数据采集模式为常规采集，测得金属板反射振幅 A_p 。接着将金属板移除，探地雷达天线不动，设定数据采集模式为常规采集，测得公路面层反射振幅 A_r 。

b) 利用公式(A.1)、(A.2)计算公路面层材料相对介电常数 ϵ_r ：

$$R = \frac{A_r}{A_p} \quad (\text{A.1})$$

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{1+R}{1-R} \quad (\text{A.2})$$

式中： R ——电磁波在不同介质界面的反射系数；

A_r ——公路面层反射波振幅；

A_p ——金属板反射波振幅。

c) 金属薄板法仅适用于空耦式探地雷达天线，且仅能测得公路面层材料相对介电常数。

11.2 钻芯实测法

a) 将探地雷达系统的各组件按照图 2 方式连接并预热。设定数据采集模式为常规采集，将雷达天线置于待测道路，测得公路路基路面电磁波反射时间 t 。在相同位置按照 JTG 3450-2019 T 0903-2019 方法钻取公路路基路面芯样，量取面层、基层和路基的总厚度 d 。

b) 电磁波在芯样内部传播双程时间可直接从探地雷达图像获取，按照公式(A.3)可计算目标材料的相对介电常数。

$$\epsilon_r = \left(\frac{0.3t}{2d} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

式中： t ——双程旅行时间(ns)；

d ——标定目标厚度(cm)。

c) 钻芯实测法能够测得公路路基路面任意相对介电常数，但是结果代表性较差。

11.3 共中点法

a) 空耦式探地雷达共中点法测量公路路基路面介电常数示意图如图 6 所示。测量系统由两套空气耦合式雷达的发射接收天线对称分置于目标点两侧。

b) 将探地雷达系统的各组件按照图 2 方式连接并预热。设定数据采集模式为共中点采集模式，将雷达天线阵列置于待测道路，由雷达数据处理软件自动识别各结构层分界线，即可得到雷达波在各层的双程走时及时间差，进而计算公路各结构层材料的介电常数。

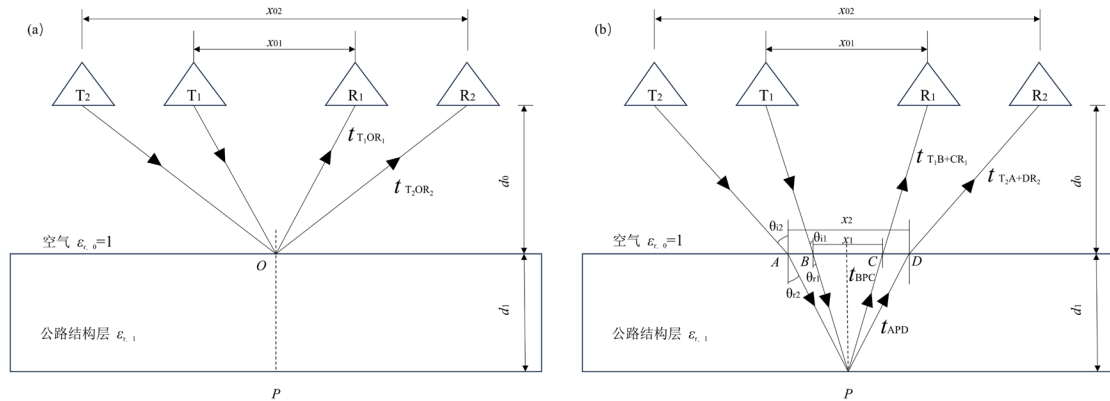


图 6 空耦式探地雷达共中点法测量介电常数示意图：(a)路面表层反射；(b)路面底部反射

公路路基路面相对介电常数计算见公式(A.4)、(A.5)、(A.6)：

$$\epsilon_r = \frac{c^2(t_{APD}^2 - t_{BPC}^2)}{x_2^2 - x_1^2} \quad (A.4)$$

$$t_{BPC} = \Delta t_1 + \frac{\sqrt{4d_1^2 + x_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{01} - x_1)^2}}{c} \quad (A.5)$$

$$t_{APD} = \Delta t_2 + \frac{\sqrt{4d_1^2 + x_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{02} - x_2)^2}}{c} \quad (A.6)$$

式中：

x_{01} —— T_1 与 R_1 间的距离；

x_{02} —— T_1 与 R_1 间的距离；

x_1 ——雷达发射-接收天线对 T_1R_1 信号传播至公路结构层表面时的距离；

x_2 ——雷达发射-接收天线对 T_2R_2 信号传播至公路结构层表面时的距离。

$t_{T_1OR_1}$ —— T_1R_1 天线在空气中的双程传输时间；

$t_{T_2OR_2}$ —— T_2R_2 天线在空气中的双程传输时间；

$t_{T_1B+CR_1}$ —— T_1R_1 天线经路面底部反射至路表以后在空气中的双程传输时间；

$t_{T_2A+DR_2}$ —— T_2R_2 天线经路面底部反射至路表以后在空气中的双程传输时间；

t_{BPC} —— T_1R_1 天线在路面内部的双程传输时间；

t_{APD} —— T_2R_2 天线在路面内部的双程传输时间；

Δt_1 —— $t_{T_1B+CR_1} + t_{BPC}$ 与 $t_{T_1OR_1}$ 的时间差，即 $\Delta t_1 = t_{T_1B+CR_1} + t_{BPC} - t_{T_1OR_1}$ ，可由探地雷达检测电磁波振幅数据获得；

Δt_2 —— $t_{T_2A+DR_2} + t_{APD}$ 与 $t_{T_2OR_2}$ 的时间差，即 $\Delta t_2 = t_{T_2A+DR_2} + t_{APD} - t_{T_2OR_2}$ ，可由探地雷达检测电磁波振幅数据获得；

c) 共中点法能够测得公路路基路面任意相对介电常数，且标定结果代表性好。

12 附录 B：探地雷达现场标定记录表

(资料性附录)

探地雷达现场标定记录表

第 页，共 页

唯一性标识编号

试验室名称：

记录编号：

项目名称			起始桩号			
公路标段			终止桩号			
检测依据			检测对象			
天气、气温 及空气湿度			施工日期/ 服役龄期			
仪器设备 及 型号						
采集参数	采集方式	采集时窗	预设介电常数	采样率	叠加次数	标记点 间距
序号	桩号及部位		标定值	文件编号		备注

13 附录 C：常见公路材料的相对介电常数及电磁波传播速度

(资料性附录)

常见公路材料的相对介电常数 ϵ_r 与电磁波传播速度 v

路面材料	相对介电常数 ϵ_r	电磁波传播速度 v (m/ns)
空气	1	0.3
水	81	0.033
冰	3	0.17
沥青	4.5~6	0.13~0.15
剥落沥青混凝土	<4	0.15~0.3
湿沥青混凝土	>8	<0.11
干柔性基层	<8	0.11~0.3
湿柔性基层	>12	<0.087
饱和柔性基层	>16	0.075~0.3
湿黏土	>20	<0.067
砂砾路基	8~15	0.078~0.11
旧混凝土	8	0.11
新混凝土	10~20	0.067~0.095
金属	∞	0

注：沥青混凝土、水泥混凝土、土为多空隙材料。材料介电常数与空隙度成反比，与空隙含水率成正比。路面材料空隙与含水率计算可按照 JTG E42-2005，土工材料空隙与含水率计算可按照 JTG 3430-2020。

15 附录 E：雷达图像生成原理

a) 雷达图像生成原理：雷达图像通常可显示为灰度图像或伪彩色图像。例如，Pavecheck 软件即采用彩色编码的成像方式，如图 7 所示。对每道 A-scan 数据进行彩色编码，正向电压越高越接近深蓝色，反向电压越高越接近于洋红色。

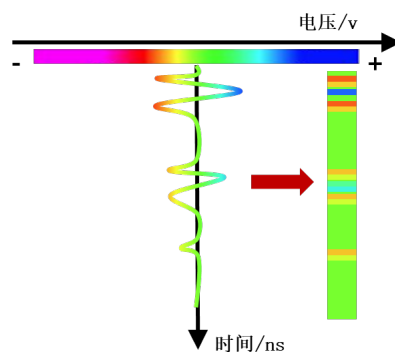


图 7 Pavecheck 软件的雷达数据成像方式

b) 雷达图像标尺：Pavecheck 软件生成的雷达图像如图 8 所示。根据图 7 所示 A-scan 数据的电压幅值及附录 C 所示的公路材料的电磁波传播速率，即可标定雷达图像的深度标尺信息，在 1GHz 的中心频率下，通常可区分出沥青路面的面层、基层和底基层。

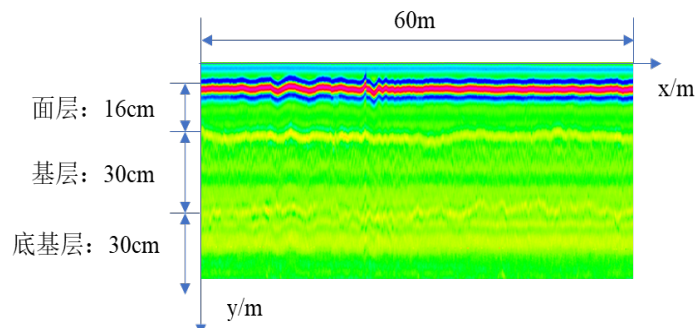


图 8 雷达图像标尺

16 附录 F：路面隐藏病害探地雷达检测信息汇总表

(资料性附录)

路面隐藏病害探地雷达检测信息汇总表

填报单位：

序号	隐患编号	道路名称	中心坐标位置		位置描述	塌陷隐患区域情况						
			经度	纬度		长度 (m)	宽度 (m)	面积 (m ²)	埋深 (m)	净深 (m)	隐患类型/隐患等级	处置意见
备注：												
记录人：			审核人：			时间：			第__页 共__页			

参考文献

- [1] 曾昭发. 探地雷达方法原理及应用[M]. 科学出版社, 2006.
- [2] 耿玉岭, 贾学民, 李大鸣. 公路路面无损检测中的探地雷达技术研究[M]. 地震出版社, 2007.
- [3] 杨峰, 张全升, 王鹏越. 公路路基地质雷达探测技术研究[M]. 人民交通出版社, 2009.
- [4] 王复明, 张蓓, 蔡迎春, 等. 层状体系介电特性反演理论及其应用[M]. 科学出版社, 2011.
- [5] 孟美丽, 王复明. 路面材料介电特性与介电模型研究[M]. 中国水利水电出版社, 2016.
- [6] 冷真, 王颀奇. 基于探地雷达技术的沥青路面现场密度无损检测[M]. 同济大学出版社, 2021.
- [7] 于晓贺. 道路沥青混合料介电常数研究[D]. 武汉理工大学, 2018.
- [8] 于晓贺. 温湿度场对沥青路面典型病害处介电特性的影响[D]. 武汉理工大学, 2022.
- [9] 刘文超. 基于 GPR-DLA 的沥青路面隐藏病害智能识别与定位[D]. 武汉理工大学, 2023.
- [10] 孙通. 路面探地雷达图像解译与三维模拟技术研究[D]. 武汉理工大学, 2019.
- [11] 李冲. 基于 GPR 与 FWD 的沥青路面结构病害解译技术研究[D]. 武汉理工大学, 2022.
- [12] 成豪杰. 基于裂缝病害的路面结构性能评价及养护决策方法研究[D]. 武汉理工大学, 2019.
- [13] 程博文. 沥青路面典型病害模型三维正演与应用[D]. 武汉理工大学, 2020.
- [14] 交通部公路规划设计院. 公路沥青路面设计规范[S]. 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [15] 内蒙古自治区市场监督管理局. 公路路基路面三维探地雷达检测规程[S]. 内蒙古自治区地方标准, 2022.
- [16] 乌鲁木齐市市场监督管理局. 城市道路塌陷隐患雷达检测技术规范[S]. 乌鲁木齐市地方标准, 2022.
- [17] 河北省质量技术监督局. 公路路基路面探地雷达检测规程[S]. 河北省地方标准, 2022.