

DB 32

江 苏 省 地 方 标 准

DB 32/T XXXX—XXXX

公路路基路面三维探地雷达检测规程

Code of practice for 3D ground penetrating radar detection of road subgrade and
pavement

(送审稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

江苏省市场监督管理局 发布

目 次

前 言 111

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 一般规定 3

 4.1 检测对象 3

 4.2 检测时间 3

 4.3 检测环境 3

 4.4 设备养护 4

 4.5 检测程序 4

5 三维探地雷达硬件组成与推荐参数 4

 5.1 硬件组成 4

 5.2 参数选取 5

6 检测准备 6

 6.1 前期资料调查 6

 6.2 现场调查 7

 6.3 涉路手续办理 7

 6.4 标定与检查 7

7 现场检测 8

 7.1 取芯标定 8

 7.2 现场检测步骤 8

 7.3 复测验证 9

 7.4 特殊路段检测要求 9

8 数据处理 9

 8.1 数据预处理 9

 8.2 数据分析 10

 8.3 数据归集 10

9 检测报告 10

 9.1 报告内容 10

 9.2 报告编制要求 10

附录 A 12

 （资料性） 12

常见材料相对介电常数 12

附录 B 13

 （规范性） 13

三维探地雷达现场记录表 13

附录 C 14

（资料性） 14

信号预处理方法原理与操作指引 14

附录 D 15

（资料性） 15

信号预处理流程示意图 15

附录 E 16

（规范性） 16

三维探地雷达隐蔽病害分析与统计表 16

附录 F 17

（资料性） 17

公路结构内部隐蔽病害典型探地雷达图谱表 17

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。

本文件由江苏省交通运输厅提出、归口并组织实施。

本文件起草单位：东南大学、武汉光谷卓越科技股份有限公司、中路交科检测技术有限公司、江苏创为交通科技发展有限公司、常熟市公路事业发展中心、宿迁市公路事业发展中心、江苏苏信交通科技有限公司、江苏一诺路桥工程检测有限公司、中创未来智能技术（南京）研究院有限公司。

本文件主要起草人：马涛、童峥、张伟光、周磊、王颀奇、陈丰、朱俊清、曹民、金光来、王小虎、程波、杨亮、汪祝庆、张一鸣、刘鸣枫、汪玉生、陈亦嘉、孙晋伟。

公路路基路面三维探地雷达检测规程

1 范围

本文件规定了三维探地雷达公路路基路面检测的硬件组成与推荐参数、检测程序、数据分析等要求。
本文件适用于各等级公路路基路面结构裂缝、层间粘结不良、材料松散破碎、空洞、脱空、富水等内容检测，城市道路、机场道路等其他类似道路路基路面检测可参照执行。

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。

- GB/T 26764 多功能路况快速检测设备
- JTG 3430 公路土工试验规程
- JTG 3432 公路工程集料试验规程
- JTG 3450 公路路基路面现场测试规程
- JTG 4110 公路路政管理技术标准
- JTG/T E61 公路路面技术状况自动化检测规程
- JJG 124 公路断面探伤及结构层厚度探地雷达
- JGJ/T 437 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准
- DB32/T 5318 路面施工安全技术规范
- DB32/T 1363 高速公路养护工程施工安全技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

三维探地雷达 3D ground penetrating radar

采用阵列天线电磁波发射、接收技术,通过采集多通道反射信号反映地层纵剖面与横剖面地质情况,能够形成高密度三维立体电磁波数据的一种物理探测系统。

3.2

探地雷达天线 GPR 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。

3.3

相对介电常数 relative dielectric constant

介质的绝对介电常数与真空介电常数的比值，为无量纲量。

3.4

天线频率 antenna frequency

探地雷达天线发射的高频电磁波频率，公路检测中工作频率一般在 80MHz-3.0GHz。

3.5

时窗 time window

探地雷达接收信号的双程旅行时间。

3.6

深度分辨率 depth resolution

沿公路深度方向，探地雷达分辨最小异常体的能力，受公路材料相对介电常数、最小异常体相对介电常数、天线频率影响。

3.7

采样率 sampling rate

单位时间内的采样点数。

3.8

水平分辨率 horizontal resolution

沿公路横断面（水平）方向，探地雷达分辨最小异常体的能力，受探测深度、天线波束宽度、天线中心频率、地下介质相对介电常数影响。

3.9

有效探测深度 effective detection depth

三维探地雷达沿公路深度方向的探测深度，受公路材料相对介电常数、最小异常体相对介电常数、天线频率影响。

3.10

有效覆盖宽度 effective detection width

沿公路横断面方向，单次三维探地雷达检测中能够接收到有效信号的扫描宽度，而非天线阵列的物理宽度，其受天线频率、探测深度及现场电磁环境影响。

3.11

信噪比 signal-noise-ratio

有效信号功率与干扰信号（噪声）功率之比。

3.12

同相轴 event

探地雷达数据中相邻道振动相位相同的极值（波峰或波谷）的连线。

3.13

信号预处理 signal pre-processing

在隐蔽病害识别前，对探地雷达信号数据的处理工作，包括增益、滤波、偏移归位、背景消除。

3.14

增益 gain

对探地雷达波信号进行放大或补偿的处理方法。

3.15

滤波 filtering

根据有效信号与干扰信号的频率分布差异，采用合理的滤波器，将干扰信号尽可能去除，保留更多有效信号的数据处理方法。

3.16

偏移归位 migration

将剖面上发生位置偏移了的反射层（同相轴）归位于其真实位置上，使剖面变得清晰，有利于正确地进行数据解译。

3.17

背景消除 background noise removal

通过对选定信号在整个剖面消除一致性的噪声，抑制水平一致性的能量，达到使雷达电磁波信号清晰的处理方法。

3.18

A 扫描 A-scan

单道波形图，也称为雷达信号或者雷达反射信号，见图1（a）。

3.19

B 扫描 B-scan

二维剖面图，也称为雷达图谱或者雷达剖面图，见图1（b）。

3.20

C 扫描 C-scan

三维切片图，由多个二维剖面堆叠形成，可直观呈现病害水平面形态，见图1（c）。

3.21

三维探地雷达智能算法 3D GPR intelligent algorithm

采用传统机器学习或者深度学习技术，依据预处理后的探地雷达A扫描、B扫描或者C扫描，自动分析公路结构内部隐蔽病害类型、位置、尺寸等。

3.22

公路结构内部隐蔽病害 pavement structure internal concealed defect

公路路基路面内部的损伤，典型隐蔽病害包括结构裂缝、层间粘结不良、材料松散破碎、空洞、脱空、富水。

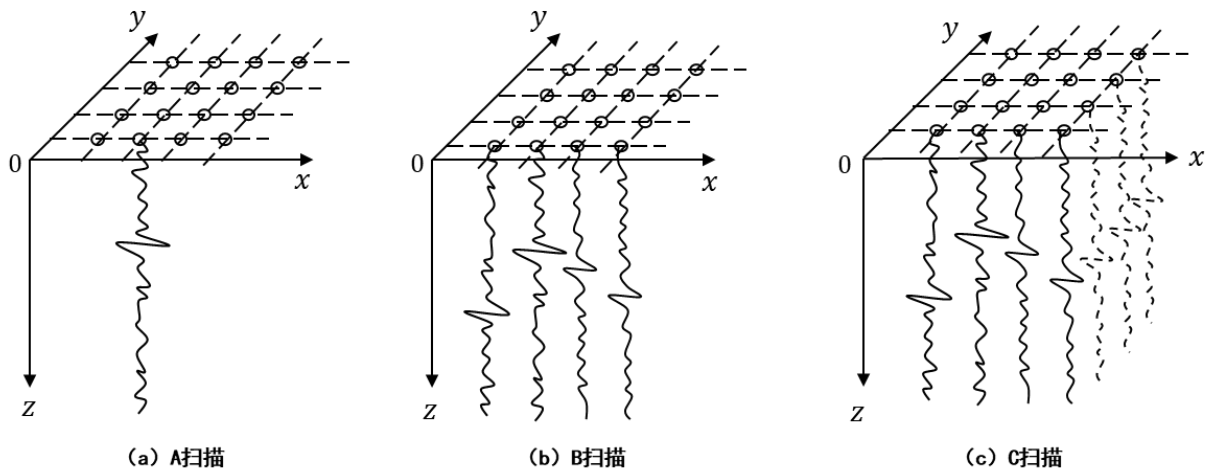


图1 三维探地雷达A扫描、B扫描、C扫描示意图

4 一般规定

4.1 检测对象

公路路基路面结构及其内部隐蔽病害。

4.2 检测时间

检测应避开降水影响期。检测前需确保检测区域连续晴好天气不少于48h，特殊潮湿地区可延长至5d。宜加强雨季前后检测，雨季前排查潜在病害，雨季后复核病害发展情况。

4.3 检测环境

4.3.1 不应在积水、积冰、积霜、积雪、沙尘等路表富含水分或存在干扰物的情况下进行，应在待检测公路表面干燥、清洁的条件下实施。

4.3.2 检测环境温度（路表温度）应在-10~50℃范围内；环境相对湿度宜控制在30%~80%，湿度大于80%时需采取防潮措施。

4.3.3 检测过程中应远离电磁信号干扰较强区域，如周边通信基站、高压输电线、施工现场大型设备；检测前应通过钻探资料进行对比试验，调查测区内有效波、干扰波分布规律。

4.4 设备养护

每年应对三维探地雷达进行定期检查、校准和保养，具体要求应符合JJG 124的规定。

4.5 检测程序

公路路基路面三维探地雷达检测包括检测准备、现场检测、数据处理与检测报告编写四个步骤，如图2所示。

- a) 检测准备应包括前期资料调查、现场调查、涉路手续办理、标定与检查。
- b) 现场检测应包括取芯标定、现场数据采集、复测验证及特殊路段检测。
- c) 数据处理应包括数据预处理、数据分析、数据归集。
- d) 检测报告编写应满足报告编制要求，内容完整。

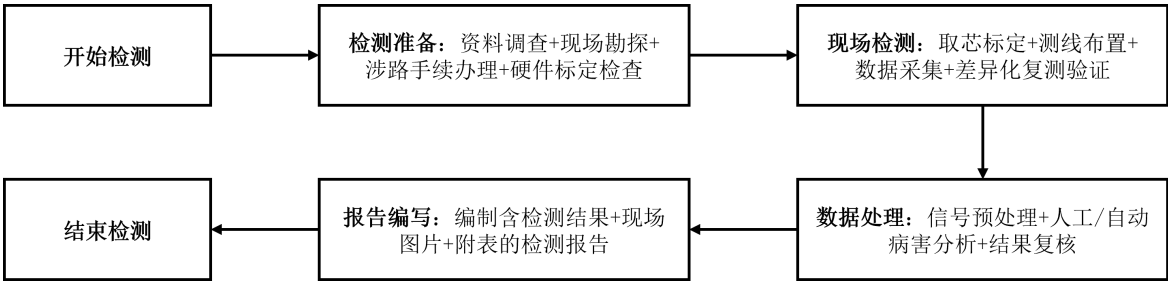


图2 检测流程图

5 三维探地雷达硬件组成与推荐参数

5.1 硬件组成

三维探地雷达硬件包括多通道阵列天线、采集主机、差分天线、测量接收与定位系统（差分基站）、行进编码器、采集软件（笔记本电脑）等，如图3所示。

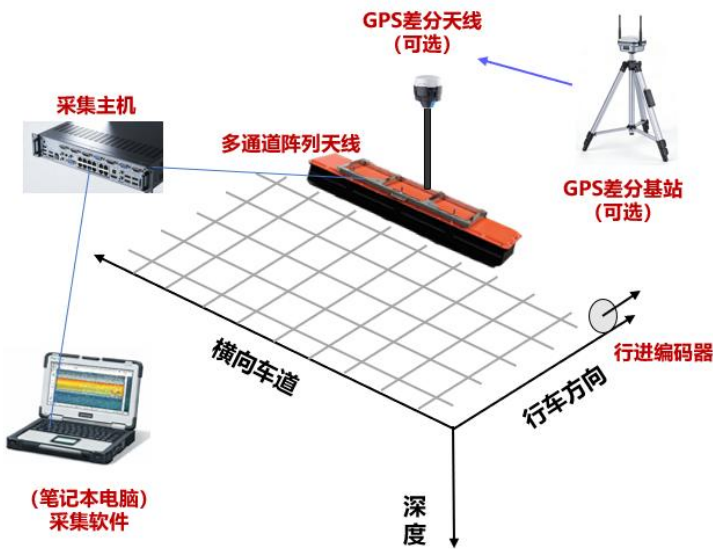


图3 三维探地雷达硬件组成示意图

三维探地雷达设备主要性能应满足如下要求：

表1 三维探地雷达设备主要性能要求

性能指标	要求内容
天线通道数	不少于8道，天线间距 ¹ 宜为0.1~0.3m，各通道应保持良好的 consistency
天线工作频率	一般在80MHz~3.0GHz
A/D转换位数	不应小于16bit
距离标定误差	不大于±1%
工作电源	宜选用可充电电池，续航能力≥4h，续航能力不足时应配置备用电源
深度分辨率	不大于5cm
水平分辨率	不少于8cm
定位系统分辨率	厘米级
有效探测深度及信噪比	覆盖检测要求深度，最深有效探测深度的信噪比不低于15dB

5.2 参数选取

5.2.1 天线参数

若选择的天线为脉冲式，按公式（1）确定天线中心频率：

$$f_c = \frac{15000}{\Delta X \sqrt{\epsilon_r}}$$
 (1)

式中：

f_c ——天线中心频率（MHz）；

ΔX ——深度分辨率（cm）；

ϵ_r ——公路结构层平均相对介电常数，多层结构平均介电常数采用厚度加权平均，常见道路工程相关材料相对介电常数见附录A。

若选择的天线为频率步进式，按公式（2）确定天线带宽：

$$BW = \alpha_1 \frac{c}{2\Delta X \sqrt{\epsilon_r}}$$
 (2)

式中：

α_1 ——加权系数，取1.1~1.2；干扰源种类小于等于4种或干扰源距天线大于3m时，取1.1；干扰源种类大于4种或干扰源距天线小于3m时，取1.2；

c ——光速，一般取30cm/ns。

ΔX ——深度分辨率（cm）；

ϵ_r ——公路结构层平均相对介电常数，多层结构平均介电常数采用厚度加权平均。

5.2.2 频率带宽

天线中心频率或天线带宽选择宜参考表2。

表2 天线参数选定表

可探测最大深度 (m)	可探测最小尺寸 (cm)	中心频率 (MHz)	相对介电常数	示例场景
0~0.04	±0.8	2800~3000	路面部分：3~10	路面检测
0.04~0.10	±1.0	2500~2800		路面检测
0.10~0.18	±1.0	2300~2500		路面检测
0.18~0.36	±2.0	1800~2300		路面检测
0.36~0.54	±3.5	1300~1800		路面检测
0.54~1.00	±5.0	800~1300	路面部分：3~10 路基部分：5~30	路基检测
1.00~1.50	±8.0	300~500		路基检测
1.50~2.00	±10.0	80~300		路基检测
注：表2中测量误差允许值可视为分辨率值；可探测最小尺寸是参考值。				

¹ 三维探地雷达相邻两个发射天线中心的距离。

5.2.3 时窗长度

时窗长度可按公式（3）计算：

$$W = \alpha_2 \frac{2d_{\max}}{v} = \alpha_2 \frac{2\sqrt{\varepsilon_r}d_{\max}}{c} \quad (3)$$

式中：

α_2 ——时窗宽度调整系数，一般取2~2.5，目标深度越小，调整系数越大；

v ——电磁波在介质中的传播速度（m/ns）；

$d_{\max}$ ——最大检测深度（m）；

c ——光速，取30cm/ns；

ε_r ——公路结构层平均相对介电常数，多层结构平均介电常数采用厚度加权平均。

5.2.4 深度分辨率

深度分辨率可按公式（4）计算：

$$\Delta X = \frac{c}{4f_c\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4)$$

式中：

ΔX ——深度分辨率（cm）；

f_c ——天线中心频率（MHz）；

ΔX ——深度分辨率（cm）；

ε_r ——公路结构层平均相对介电常数，多层结构平均介电常数采用厚度加权平均。

5.2.5 采样率

采样率可按公式（5）计算：

$$S = \frac{W \cdot f_c \cdot k}{500} \quad (5)$$

式中：

S ——采样率；

W ——时窗长度（ns）；

k ——采样率调整系数，根据天线中心频率调整，一般取6~10，深度小于0.5m的检测取8~10，深度大于等于0.5m的检测取6~7。

5.2.6 水平分辨率

水平分辨率可按公式（6）计算：

$$\Delta Y \approx \sqrt{\frac{\lambda z}{2}} = \sqrt{\frac{cz}{2f_c\sqrt{\varepsilon_r}}} \quad (6)$$

式中：

ΔY ——水平分辨率（cm）；

z ——目标的探测深度；

λ ——波长（cm）。

6 检测准备

6.1 前期资料调查

前期资料调查应包括如下内容：

- 检测路段车道数、线形、路基路面结构、道路材料信息、桥涵位置、交通量等相关资料；
- 收集检测路段桩号控制点资料（含平面坐标、高程、桩号里程），明确关键桩号（如起止桩、桥梁/隧道进出口桩、交叉口桩）的具体位置，为现场位置标定提供依据；
- 检测路段近3年内路基路面养护工程信息；存在结构调整的应单独标识；
- 检测路段内近3年检测结果，重点关注结构裂缝、富水、脱空等病害；

e) 检测路段检测时间段及其前后48h的天气情况，避免雨天作业。

6.2 现场调查

现场调查应包括如下内容：

- a) 现场校核检测路段内的车道数、桩号控制点及定位系统匹配性：采用定位系统与关键桩号比对，误差应≤0.5m。
- b) 记录检测路段内对检测工作有影响的环境干扰因素，包括但不限于：电磁干扰（如周边通信基站、高压输电线、施工现场大型设备）；地形障碍（如路肩高差、边坡垮塌、中央分隔带遮挡）；交通干扰（如施工占道、车流密集路段、交叉口频繁停车）；路表干扰（如局部积水、油污污染、松散浮料堆积）。

6.3 涉路手续办理

涉路检测作业前，应按照JTG 4110、DB32/T 5318、DB32/T 1363要求，办理相关涉路审批手续，编制检测方案，报相关公路管理部门及交通管理部门备案，经批准后方可实施。

6.4 标定与检查

6.4.1 标定

- a) 行进编码器标定：选取平整、无坡度路侧区域，在路表上划定不少于100m的直线区间，在起始点、终止点路表做清晰标记（如喷漆或放置标定桩）；标定时，测距轮中心线需分别对准起始点、终止点标记。承载车行驶至起点，点击行进编码器控制系统中“开始标定”或同功能按钮，承载车沿直线行驶至终点，点击系统中“标定完成”或同功能按钮，输入实际承载车行驶距离，完成标定工作。行进编码器至少进行2次标定，误差应不大于2%。
- b) 介电常数标定：检测不同结构或材料的公路路基路面时，应标定公路结构层材料相对介电常数。标定段长度推荐5km，根据检测段落长度确定，标定点位个数不少于2个，标定段内相对介电常数取平均值。山区公路、软土路基、岩溶发育区等复杂地质区域，标定段长度缩减至2~3km，标定点位个数每1km不少于1个。标定方法包括手持式介电常数仪法、室内介电常数测定法、金属薄板法等。采用手持式介电常数仪法时，仪器探头紧贴芯样上表面，每个芯样测试3个不同位置的介电常数仪，取平均值作为测试结果；室内介电常数测定法应采用平行板电容法测试，测试环境温度20±2℃、湿度50±5%；采用金属薄板法时，在标定区域铺设金属薄板（尺寸大于等于1m×1m），雷达天线垂直对准薄板，记录反射信号，计算介电常数。公路常见材料相对介电常数范围见附录A表A.1。
- c) 定位系统标定：定位系统与时钟采用产品说明书要求方法进行标定，误差应不大于1%。
- d) 离地高度标定：标定空气耦合式三维探地雷达接发天线中心至路表高度。离地高度测量与三维探地雷达检测时的车辆荷载应保持一致。具体要求见表3。地面耦合式雷达天线应紧贴路表。

表3 空气耦合式三维探地雷达天线参数与离地高度要求

天线中心频率（MHz）	离地高度（cm）	示例场景
2800~3000	30~60	路面检测
2500~2800	40~70	路面检测
2300~2500	20~50	路面检测
1800~2300	15~40	路面检测
1300~1800	10~30	路面检测
800~1300	8~20	路基检测
300~500	5~15	路基检测
80~300	3~10	路基检测

6.4.2 检查

检查包括三维探地雷达系统时间触发模式各接发天线是否异常。如有异常，需及时排除。若现场无法排除，需返厂维修。

7 现场检测

7.1 取芯标定

7.1.1 路面宜每5km钻取2个芯样，芯样应包括上面层、中面层与下面层，用于相对介电常数标定。取样按照JTG 3450要求。

7.1.2 钻芯取样应遵循均匀分布、覆盖差异原则，具体要求如下：按路面结构型式划分单元，同一结构类型（如沥青路面、水泥路面）至少布置1个标定点；宜按施工标段划分，每个标段至少布置1个标定点（标段长度不足5km的，宜与相邻路段合并，按密度要求布置）；钻取位置应选择无病害、结构均匀的区域，距路面边缘大于等于1m，确保芯样能真实反映该区域结构层材料特性；标定点应在现场做好标记，并记录桩号、结构层类型等信息，同步录入附录B现场记录表。

7.1.3 标定方法如下：

a) 实施步骤：

1) 标定段选择：选取无病害、结构均匀的路段，长度大于等于100m；

2) 取样要求：每5km布置2个标定点，采用Φ100mm钻芯机钻取芯样，芯样高度与结构层厚度一致（50~100mm），表面平整无破损，密封保存；

3) 测试方法包括手持式介电常数仪法、室内介电常数测定法、金属薄板法等。

b) 测试频率：与现场检测所用天线中心频率一致（100MHz~3.0GHz）；

c) 试件尺寸：芯样直径100mm，高度50~100mm，表面平整度误差≤0.5mm；

d) 路面结构层平均相对介电常数可按公式（7）计算：

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c \cdot t}{2d} \right)^2 \quad (7)$$

式中：

c ——光速，取30cm/ns；

t ——电磁波在芯样的传播走时（ns）

d ——芯样长度（cm）；

e) 结果处理：标定段内介电常数取2个芯样测试结果的平均值。

7.2 现场检测步骤

7.2.1 按照三维探地雷达设备通用安装规范及安全操作要求，将雷达主机、雷达天线、行进编码器、定位系统、时钟等安装牢固，雷达天线应安装于承载车后方。天线支架周围应配备警示灯、反光条带、警示牌。检查连接线安装无误后开机预热，预热时间不应少于使用说明规定的时间，通常不少于5-10分钟。低温环境下，设备开机前预热不少于15min，采用保温套保护雷达主机及天线，避免设备直接接触冰雪，检测后及时清理设备表面积雪、积冰。高温环境下，检测车开启空调，确保检测车内设备工作环境温度小于等于35℃，缩短连续检测时间，建议每2h停机休息30min，防止设备过热故障。

7.2.2 打开数据采集软件，进行探地雷达系统试运行，检查雷达系统与承载车的运行状况，设定数据采集模式。若系统有其他预处理操作要求，按使用说明执行。

7.2.3 根据探地雷达有效覆盖宽度、主要隐蔽病害类型、公路结构层相对介电常数、测区地形、工程地质情况提前布置测线。待检测路段每个检测方向应至少检测一个主要行车道。高速、一、二、三、四级公路的路面内部隐蔽病害检测宜选择技术状况相对较差的车道。对于有效覆盖宽度小于70%车道宽度的三维探地雷达，一个主要行车道至少扫描2次，再依据定位系统与行进编码器数据将2次扫描结果进行拼接，拼接后的有效覆盖宽度不小于70%车道宽度且覆盖两侧轮迹带。

7.2.4 三维探地雷达检测车行驶速度应不低于检测车道最低行驶速度，检测过程中应采取安全保障措施，宜在检测车辆后方配备安全防护车进行防护。按批复后的检测方案执行。

7.2.5 三维探地雷达检测车作业过程中，车内应配置不少于2名操作人员与1名司机，1名操作人员依据雷达采集系统要求进行操作，另1名操作人员进行检测过程记录，记录内容见附录B表B.1。

7.2.6 检测结束后，操作人员应形成完整的数据文件。

7.3 复测验证

7.3.1 复测验证按照病害类型差异化执行：公路结构内部隐蔽病害复测验证比例应大于等于异常信号区总数的10%；高风险病害（空洞、脱空、大面积疏松、大范围富水）按照JGJ/T 437要求实行100%验证，确保病害位置、规模判断准确。大面积疏松是连续分布且面积大于20m²的疏松病害；大范围富水是长度大于等于5m或宽度大于等于单车道宽度的富水病害。

7.3.2 验证方法：路面结构层病害宜采用钻孔验证、回弹测试等方式；路基深层病害宜采用钻孔验证、高密度电法、地质雷达复测等联合方式，准确核实路基路面内部病害的真实情况。

7.4 特殊路段检测要求

7.4.1 山区陡坡路段（坡度≥5%）：测线布置密度加密至每车道3次扫描，确保横向有效覆盖宽度≥90%；行驶速度应按表3对应频段下限降低5km/h，避免速度过快导致信号采集不充分；数据校正需结合高程数据，消除坡度对深度计算的影响。校正步骤如下：

a) 提取探地雷达数据中的定位系统高程数据，采用地理信息系统软件将定位系统高程数据与探地雷达数据配准；

b) 计算探地雷达数据高程配准值与离地高度标定值的差值，为天线离地校准高度 h ；

c) 按公式（8）计算探地雷达电磁波在空气中的走时：

$$t_a = \frac{2h}{v_a} \quad (8)$$

式中：

v_a ——电磁波在空气中的传播速度，取0.3m/ns；

h ——天线离地校准高度（m）

d) 按公式（9）计算探地雷达电磁波在路基路面中的走时：

$$t_m = t - t_a \quad (9)$$

式中：

t ——电磁波从发射到接收的走时（ns）；

t_a ——探地雷达电磁波在空气中的走时（ns）；

e) 按公式（10）计算校正后的内部病害深度：

$$d_c = \frac{c \times t_m}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

式中：

c ——光速，取30cm/ns；

t_m ——探地雷达电磁波在路基路面中的走时（ns）；

ϵ_r ——公路结构层平均相对介电常数，多层结构平均介电常数采用厚度加权平均。

7.4.2 桥头及接线路段：测线延伸至桥头搭板前后各50m，每20m设置1个竖向分辨率校验点；采用“高频+低频”联合检测（高频检测搭板浅层，低频检测路基深层）；数据校正应剔除搭板与路基衔接处的信号突变干扰。

7.4.3 隧道出入口路段：测线覆盖洞口前后各100m，避开隧道洞口电磁干扰区，距离洞口大于等于20m；行驶速度控制在表3对应频段下限，确保信号稳定性；数据处理时强化电磁干扰滤波，提升病害识别准确性。

8 数据处理

8.1 数据预处理

8.1.1 进行零点校正，明确地面反射点的位置；

8.1.2 采用归一化方法，消除采集数据的水平距离误差；

8.1.3 选取增益、频率滤波、背景消除、反褶积、偏移归位、空间滤波、数据平滑、地形校正等处理方法；在数据处理各阶段均选择频率滤波，消除某一频段的干扰波；用反褶积压制多次反射波干扰，

反射子波宜是最小相位子波；用空间滤波的有效道叠加或道间差方法，提高异常信号的连续性、独立性和可解译性；

8.1.4 在其它方法处理完后，可采用振幅均衡、自适应增益或能量归一化等方法提高振幅一致性；

8.1.5 信号预处理方法与操作指引见附录C，流程图可参考附录D。

8.2 数据分析

8.2.1 分析要求

数据分析应包括隐蔽病害状况分析。隐蔽病害状况分析应统计10m范围内的隐蔽病害类型与埋深，统计的隐蔽病害宜满足表4最小尺寸要求，低于最小尺寸的隐蔽病害可不纳入统计。

表4 应统计隐蔽病害的最小尺寸要求

病害类型	最小尺寸要求
结构裂缝	宽度大于等于0.5mm且长度大于等于10cm
层间粘结不良	分离厚度大于等于5mm且面积大于等于0.5m ²
材料松散破碎	面积大于等于1.0m ² 且深度大于等于1cm
空洞	直径/边长大于等于3cm且深度小于等于1.0m
脱空	面积大于等于0.2m ² 且厚度大于等于1cm
富水	面积大于等于0.2m ² 且含水率大于等于20%

8.2.2 分析步骤

- a) 选取清晰、信噪比高的预处理后A扫描、B扫描、C扫描数据；
- b) 结合现场记录和调查资料，排除预处理后未消除的A扫描、B扫描、C扫描数据异常干扰；
- c) 结合现场记录和调查资料，参考附录F表F.1，判定A扫描、B扫描、C扫描数据是否存在隐蔽病害导致的异常；
- d) 参考附录F表F.1，根据同相轴及振幅、相位和频率等属性，确定隐蔽病害的类型；
- e) 结合B扫描与C扫描数据，测定隐蔽病害桩号、埋深与尺寸；
- g) 分析结果按附录E表E.1与附表E.2要求记录。

8.3 数据归集

原始检测数据及分析结果应采用通用数据格式存储，A扫描数据采用CSV格式，B扫描与C扫描数据宜采用PNG/JPEG格式，统计表格宜采用Excel格式。

9 检测报告

9.1 报告内容

报告应包括以下内容：

- a) 项目概况
- b) 项目路段运营情况
- c) 检测内容、方法、依据
- d) 检测原理
- e) 工作量完成情况及质量评述；
- f) 检测结果（附表C.1与附表C.2是必须项）
- g) 养护建议
- h) 附图、附表。

9.2 报告编制要求

报告编制应符合如下要求：

- a) 报告编写应根据任务书、设计书及有关文件进行；

- b) 成果报告应在系统收集、分析、整理工作区的路基路面结构设计、工程地质等有关资料的基础上编写；
- c) 成果报告应包含复测的验证结果；
- d) 成果报告应章节合理、内容全面、重点突出、立论有据、结构严谨文字简练、图文并茂、结论明确；
- e) 报告附图、附件目的明确、配置合理、美观整洁。

附录 A
(资料性)
常见材料相对介电常数

常见公路工程相关材料相对介电常数如表 A.1 所示。

表 A.1 常见材料相对介电常数

材料	相对介电常数	材料	相对介电常数
空气	1	沥青混凝土	3~10
纯净水	81	水泥混凝土	4~15
冰	2~5	土	3~20
沥青	3~6	水泥	4~6
玄武岩	7~9	石灰岩	4~8
透水沥青混凝土	4~7	钢渣沥青混凝土	6~10
软土	18~25	石林喀斯特岩体	8~12
岩溶充填物（黏土质）	15~20	岩溶充填物（砂质）	10~15
注：沥青混凝土、水泥混凝土、土为“颗粒-空气-水”组成的多向介质材料，具体相对介电常数受当地环境条件影响，检测前建议采用手持式介电常数仪或其他标定设备进行标定。路面材料空隙与含水率计算可按照JTG 3432，土工材料空隙与含水率计算可按照JTG 3430。			

附录 B
(规范性)
三维探地雷达现场记录表

三维探地雷达现场记录表如表 B.1 所示。

表 B.1 三维探地雷达现场记录表

路段名称及起止桩号： 第 页/共 页编号：				操作人： 记录人：			天气：	
检测地点：		仪器型号：		天线频率范围（MHz）			日期：	
测线编号	测线方向	起点桩号	终点桩号	测线长度 （m）	干 扰 源 种 类	干 扰 源 标 记号	整 桩 号 标记号	备注（采 样 率 等 参数）

注：单条测线长度不超过10km；干扰源标记号与整桩号标记号要求三维探地雷达采集软件或者硬件具有数据标记与记录功能。

附录 C
(资料性)
信号预处理方法原理与操作指引

信号预处理方法原理与操作指引如表 D.1 所示。

表 D.1 信号预处理方法原理与操作指引

处理方法	核心原理	适用场景	具体操作步骤
零点校正	明确地面反射点位置，消除天线离地高度对深度计算的影响	所有检测场景（必做步骤）	1. 选取路表平整无病害区域；2. 识别雷达信号中地面反射的最强波峰；3. 将该波峰位置设定为零点
频率滤波	依据有效信号与干扰信号的频率差异，去除干扰（如高频电磁干扰、低频地面波动）	存在明显干扰信号的场景	1. 分析干扰信号频率；2. 选择带通滤波器；3. 设定滤波范围，剔除干扰频率
背景消除	压制水平一致性噪声（如仪器本身噪声），突出异常信号	噪声分布均匀的检测数据	1. 选取无异常信号的背景区域；2. 采用均值去除法计算背景噪声；3. 从原始信号中减去背景噪声
反褶积	压缩反射子波宽度，消除多次反射干扰，提升纵向分辨率	多次反射波明显的场景（如富水、脱空区域）	1. 提取反射子波（优先选择最小相位子波）；2. 设定反褶积迭代次数（3-5 次）；3. 执行反褶积运算
偏移归位	将偏移的反射层归位至真实位置，使剖面更清晰	反射层倾斜、绕射波明显的场景	1. 输入介质平均介电常数；2. 选择 Kirchhoff 偏移算法；3. 设定偏移速度
空间滤波	利用道间信号相关性，增强有效信号连续性，抑制随机干扰	有效信号不连续的场景	1. 选择“道间差”或“有效道叠加”算法；2. 设定滤波窗口（3-5 道）；3. 执行空间滤波
数据平滑	降低信号波动，减少孤立噪声点	信号杂乱但无明显干扰波的场景	1. 选择“滑动平均”算法；2. 设定平滑窗口（1-3 个采样点）；3. 执行平滑运算
地形校正	消除路面起伏对信号深度计算的影响	路面平整度较差的检测路段	1. 导入定位系统采集的路面高程数据；2. 按高程变化调整信号深度计算参数；3. 修正雷达剖面的地形偏差

附录 D
(资料性)
信号预处理流程示意图

信号预处理流程如图 E.1 所示。

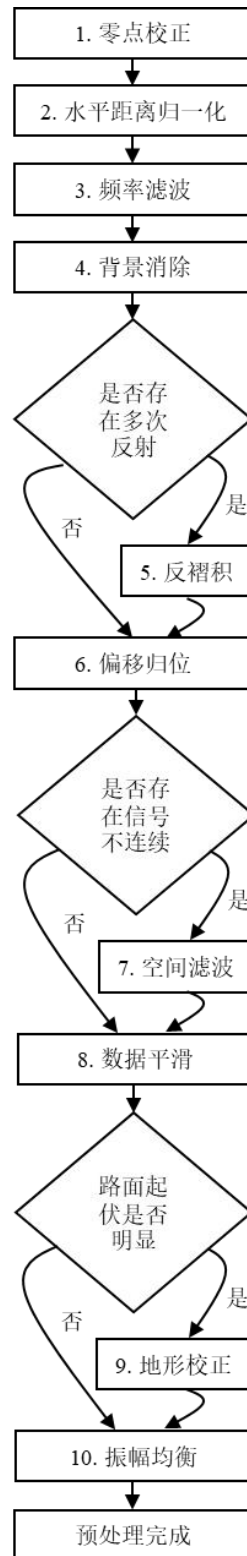


图 E.1 信号预处理流程示意图

附录 E
(规范性)
三维探地雷达隐蔽病害分析与统计表

三维探地雷达隐蔽病害分析表如表 E.1 所示。

表 E.1 三维探地雷达隐蔽病害分析表

桩号	病害类型	病害埋深	病害尺寸	桩号	病害类型	病害埋深	病害尺寸

填表说明：1. 桩号范围：按“KXXX+XXX-KXXX+XXX”格式填写，单条病害填写精准桩号区间（误差≤10cm）；2. 损伤埋深：单位为 cm；3. 病害尺寸：裂缝类：长度精确至 0.1m，宽度精确至 0.1mm；面积类：精确至 0.1m²；材料松散破碎：按“10m 单位”填写整数。三维探地雷达隐蔽病害统计见表 E.2。

表 E.2 三维探地雷达隐蔽病害统计表

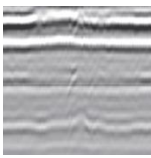
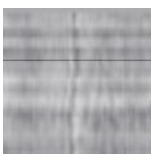
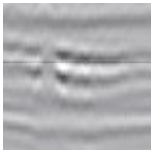
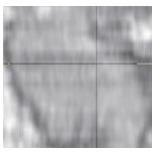
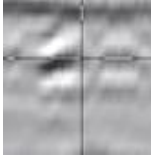
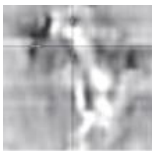
区 间	长度 (km)	结构裂缝 (处)	层间粘结不良 (处)	材料松散破碎 (10m)	脱空 (处)	富水 (处)	空洞 (处)

注：路基路面不同病害在表中按需填写。

附录 F
(资料性)
公路结构内部隐蔽病害典型探地雷达图谱表

公路结构内部隐蔽病害典型探地雷达图谱如表 F.1 所示。

表F.1 公路结构内部隐蔽病害典型探地雷达图谱表

病害类型	物理特征	相位变化	图谱特征	
			B扫描	C扫描
结构裂缝	由基层温缩、干缩效应或车辆动载引起的道路结构层开裂，其内部充填介质通常为空气，介电常数小于周边介质	裂缝处反射波相位突变，双曲线顶端相位反转，两侧相位对称分布	开口向下对称“双曲线”形，顶端有间断	横向和纵向裂缝分别呈沿道路横断面和纵断面方向的“细条带”
				
层间粘不良	由施工期间压实不足、基层自然沉降、唧泥等引起的层位局部分离，其内部充填介质通常为空气，介电常数小于周边介质	分离界面反射波相位反转明显，同相轴连续且相位稳定，无明显波动	中部较强振幅的连续同相轴，两端有绕射波	较强振幅呈区域化分布
				
松散	面层、基层混合料粘结料缺失，形成集料松散，空隙率大；或路基土体不密实，空隙率高于周边土体，介电常数一般小于周边介质	松散区域相位信号紊乱，无固定相位规律，多次反射波导致相位叠加干扰	振幅较强，同相轴不连续，内部波形杂乱，多次波明显	较强振幅呈现区域化分布，雪花状明显
				
脱空	混合料或土体在水冲刷下粘结料及细料流失或路基自然沉降，形成层间脱离、不连续，多为扁平状空腔，内部一般含水，介电常数远大于周边介质	脱空界面反射波相位反转，多次反射导致相位叠加，形成连续的相位异常带	多为平板状，可为“双曲线”形，起始点较模糊，多次波较明显	较强振幅呈现区域化分布，区域较小
				
富水	路基路面内部存在饱和水或富水带，介质介	富水区域反射波相位发生显著反转，同相轴	强反射信号形成连续水平或倾斜同相	片状或带状强振幅区域，边界相对模

	电常数远高于周边土体、混合料	连续无间断，相位值稳定，与周边非富水区域形成明显相位分界	轴，振幅均匀且强度高，无明显间断	糊，呈不规则扩散形态
				
空洞	路基路面内部形成的封闭空腔，内部多为空气或少量杂物，介电常数远低于周边介质	空洞边界反射波相位急剧反转，闭合区域内一般无相位响应，周边绕射波相位紊乱，与边界相位形成鲜明对比	双曲线形反射边界，边界清晰锐利，内部无反射信号，周边伴随绕射波扩散	圆形、椭圆形或不规则形状的弱振幅区域，边界环绕强反射圈，内部信号微弱
				

注：表中典型频率段以800MHz为例，实际检测时可根据所用天线频率参考调整。