

公路路基路面三维探地雷达检测规程

Regulation of 3d ground penetrating radar detection for road subgrade and pavement

地方标准信息服务平台

2022-06-24 发布

2022-06-24 实施

目 次

前言	11
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本规定	3
5 三维探地雷达检测系统	3
5.1 仪器设备组成	3
5.2 三维探地雷达参数选取	4
6 检测准备及环境要求	5
6.1 前期资料调查	5
6.2 现场踏勘	5
6.3 检测环境要求	5
7 检测程序	5
7.1 系统标定	5
7.2 现场检测	6
7.3 复测验证	6
8 数据分析	6
8.1 数据处理	6
8.2 数据解译	7
9 报告编写	7
附录 A (规范性) 常见材料相对介电常数	8
附录 B (规范性) 公路材料相对介电常数标定	9
附录 C (规范性) 三维探地雷达现场记录表	11

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。

本文件由内蒙古自治区交通运输科学发展研究院提出。

本文件由内蒙古自治区交通运输厅归口。

本文件起草单位：内蒙古自治区交通运输科学发展研究院、哈尔滨工业大学、香港理工大学、内蒙古呼和浩特新机场高速公路管理有限责任公司、准格尔旗高等级公路投资有限责任公司、内蒙古公路交通投资发展有限公司、欧美大地仪器设备中国有限公司、上海圭目机器人有限公司、长安大学。

本文件主要起草人：赵鑫、王大为、张洪伟、汤伏蛟、王学营、沈永飞、杨永平、刘振正、刘彦杉、石占斌、王新宽、冷真、赵晓亮、崔洪涛、王纬东、张袁备、谢春磊、陆国阳、惠冰、钟新然、王颀奇、洪斌、邢超、吕浩天、叶呈森、郭志祥、王博、云利华、杨睿、邓勇军、杨迎春。

地方标准信息服务平台

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设备、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层厚度、脱空、含水和含冰程度、裂缝等内容检测，其他等级公路路基路面检测可参考执行。

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。

- JT/T 940 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
- JTG 3430 公路土工试验规程
- JTG 3450 公路路基路面现场测试规程
- JTG E42 公路工程集料试验规程

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探地雷达，可用于公路工程结构层厚度、含水率、脱空、内部裂缝等检测，为一种无损检测技术。

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。探地雷达天线分为脉冲式与频率步进式，以Hz为单位。

3.3

相对介电常数 relative dielectric constant

介质相对于真空的介电常数，以字母 ϵ_r 表示。

3.4

测距轮 distance measurement instrument

一种通过转动测量距离的装置，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。

3.5

扫描率 scan rate

单位时间或距离内的扫描次数。

3.6

时窗 time window

探地雷达接收信号的时间范围。

3.7

分辨率 resolution

分辨最小异常体的能力。

3.8

增益 gain

对探地雷达波信号进行放大或补偿的处理方法。

3.9

同相轴 events

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。

3.10

信噪比 signal-noise-ratio

有效信号功率与干扰信号（噪声）功率之比。

3.11

滤波 wave 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。

3.12

反褶积（反滤波） deconvolution (inverse filtering)

去除探地雷达波信号中雷达子波长影响，保留地下反射系数信号的数据处理方法。

3.13

偏移归位 migration

探地雷达波信号记录中将每个地下反射点移动至原有位置的数据处理方法。

3.14

背景去噪 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。

4 基本规定

- 4.1 三维探地雷达检测内容包括路基路面结构层厚度、脱空、含水和含冰情况、裂缝等。
- 4.2 公路含冰分布检测可在每年 11 月至次年 6 月进行，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，确定冻土区平均介电常数和大致厚度范围。
- 4.3 三维探地雷达应每年定期检查、校准和保养，具体要求应符合 JT/T 940 的规定。

5 三维探地雷达检测系统

5.1 仪器设备组成

包括雷达主机、雷达天线、采集触发系统、测量接收定位系统、里程计、测距轮等，如图1所示。

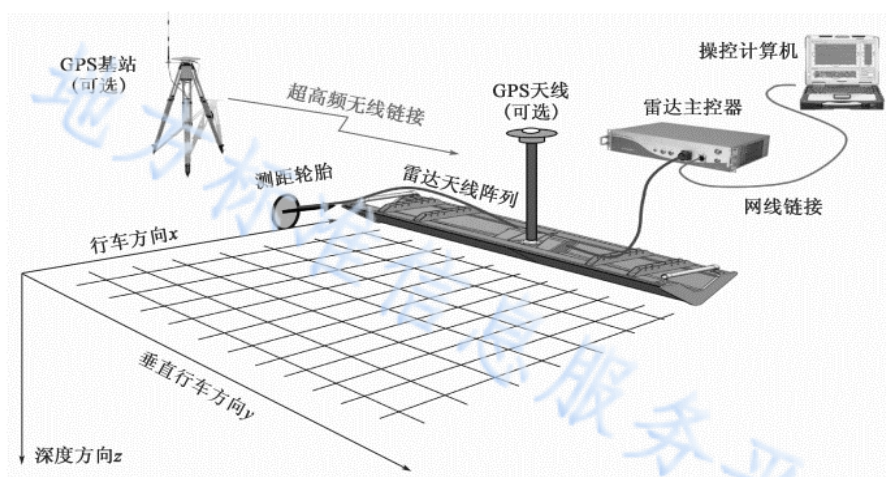


图1 三维探地雷达设备示意图

三维探地雷达设备主要性能应满足如下要求：

- a) 天线通道数不少于8道，各通道应保持良好的一致性；
- b) A/D转换位数不应小于16 bit；
- c) 距离标定误差不大于 $\pm 2\%$ ；

- d) 工作电源宜选用可充电电池，续航能力应在4 h以上，续航能力不足时，应配置备用电源；
- e) 垂直分辨率不大于0.5 ns；
- f) 测量接收定位系统的分辨率为厘米级。

5.2 三维探地雷达参数选取

5.2.1 雷达天线参数的选取应满足如下要求。

5.2.1.1 脉冲式探地雷达

若选择的天线为脉冲式，可按公式（1）确定天线中心频率：

$$f_c = \frac{15000}{x\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- f_c ——天线中心频率（MHz）；
- x ——分辨率（cm）；
- ϵ_r ——公路结构层平均相对介电常数，常见道路工程相关材料介电常数见附录A。

5.2.1.2 频率步进式探地雷达

若选择的天线为频率步进式，可按公式（2）确定天线带宽：

$$BW = \alpha_1 \frac{c}{2x\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- BW ——天线带宽（GHz）；
- α_1 ——加权系数，取1.1~1.2，充分考虑全频率信号衰减，干扰源种类小于等于4种或干扰源距天线大于3 m时，取1.1；干扰源种类大于4种或干扰源距天线小于3 m时，取1.2；
- c ——光速，一般取30（cm/ns）。

5.2.2 天线中心频率或天线带宽选择宜参考表 1。

表1 天线参数选定表

检测深度（m）	测量误差允许范围（cm）	中心频率（GHz）	带宽（GHz）
<0.2	±1.0	2.8~3.2	3.0~3.5
0.2~0.4	±2.0	2.3~2.8	2.6~3.0
0.4~0.7	±3.5	1.3~2.3	1.5~2.6
0.7~1.0	±5.0	0.9~1.3	1.0~1.5
1.0~1.5	±7.5	0.4~1.0	0.6~1.0
>1.5	±15.0	0.1~0.4	0.2~0.6

注：表1中测量误差允许值可视为分辨率值。

5.2.3 时窗长度可按公式（3）确定。

$$W = \alpha_2 \frac{2d_{max}}{v} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- W ——时窗长度（ns）；
- α_2 ——加权系数，一般取2~2.5，目标深度越小，加权系数越大；
- d_{max} ——最大检测深度（m）；
- v ——电磁波在介质中的传播速度（m/ns）。

5.2.4 扫描样点数可按公式（4）确定：

$$S = \frac{w \cdot f_c \cdot k}{500} \dots \dots \dots (4)$$

式中：

S ——扫描样点数；

W ——时窗长度（ns）；

f_c ——天线中心频率（MHz）；

k ——扫描样点数调整系数，根据天线中心频率调整，一般取6~10。

6 检测准备及环境要求

6.1 前期资料调查

前期资料调查主要包括如下内容：

- a) 检测区域路面结构、道路材料信息、交通量等相关资料；
- b) 检测区域近3年内路面养护及维修等相关信息；
- c) 检测区域内历年检测结果，重点关注冻胀、翻浆、裂缝等病害；
- d) 与检测工作有关的其他资料，如检测区冻土分布等。

6.2 现场踏勘

现场踏勘主要包括如下内容：

- a) 现场校核检测路段内的车道数与坐标控制点；
- b) 记录检测路段内对检测工作有影响的环境干扰因素。

6.3 检测环境要求

检测环境包括如下要求：

- a) 检测环境温度（空气温度）应在-30℃~40℃范围内；
- b) 待测道路应保证路面清洁、平整，无大块凸起物；
- c) 检测过程中应远离电磁信号干扰较强区域；
- d) 待测路面无明显积水，无降雨、降雪及沙尘干扰。

7 检测程序

7.1 系统标定

系统标定主要包括如下内容：

- a) 测距轮标定：选取平整、无坡度路面，在路面上划定一定距离区间，承载车行驶至起点，点击软件界面中“开始标定”按钮，承载车沿直线行驶至终点，点击软件界面中“标定完成”按钮，输入实际承载车行驶距离，完成标定工作。标定距离应不小于100 m，误差应不大于2%。当承载车胎压变化明显或日平均气温变化超过15℃时，应重复此项标定；
- b) 检测不同结构或材料的公路路基路面时，应标定公路材料相对介电常数或电磁波传播速度。标定段长度20 km，标定点位个数不少于4个，标定段内相对介电常数取平均值。公路结构层含水率变化较大、路表病害较多时，应适当增加标定点数。标定方法包括金属薄板法、钻芯实测法、共中点法，具体操作及计算方法见附录B。

7.2 现场检测

现场检测主要包括如下步骤：

- 按照使用说明中的安装方法将雷达主机、雷达天线、拆卸式支架、采集触发设备、定位设备等安装牢固，雷达天线应安装于承载车后方，天线悬空高度见表 2。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；
- 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。公路材料相对介电常数数据采集选择共中点采集模式；公路层厚、病害数据采集选择常规采集模式；
- 根据雷达天线宽度、检测目的、测区地形、工程地质情况提前布置测线，应做到行车道全覆盖。测线应沿车道前进方向布置，测线间距应不大于三维雷达天线阵列 0.5 倍宽；
- 雷达检测车行驶速度应根据雷达天线频率调整，天线频率越低，雷达系统行驶速度越低（见表 2）。雷达天线频率推荐值见表 1；
- 记录检测区域起点位置与终点位置，检测过程中记录路表病害位置信息，如路面坑槽、结冰、融沉、修补等；
- 检测结束后，操作人员应检查数据文件，要求文件完整，内容正常，否则重新检测。

表2 行驶速度、悬空高度选定表

中心频率 (MHz)	带宽 (GHz)	行驶速度 (km/h)	悬空高度 (cm)
2800~3200	3.0~3.5	30~80	30~60
2300~2800	2.6~3.0		
1300~2300	1.5~2.6		
900~1300	1.0~1.5	20~30	10~30
400~1000	0.6~1.0	<20	<10

7.3 复测验证

复测验证为前期检测分析的补充工作，复测验证比例不少于异常信号区总数的10%。为了消除外界环境、定位信号对雷达探测的影响，对雷达探测信号异常区域进行复测验证。宜对道路结构层脱空、道路结构内部裂缝、路基土疏松、融沉、空洞等影响公路服役性能的缺陷进行钻孔验证等试验，达到准确核实路基路面内部缺陷的目的。

8 数据分析

8.1 数据处理

8.1.1 数据处理主要包括如下内容：

- 进行零点校正，明确地面反射点的位置；
- 对自由连续采集的数据进行水平距离归一化处理；
- 根据需要选取增益、频率滤波、背景去噪反褶积、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；

g) 在其它方法处理完后, 改变反射信号的振幅特征。

8.1.2 探地雷达数据处理包含数据预编辑、数据预处理、常规处理、高级处理、解释处理, 雷达数据流程应符合 JGJ/T 437 中的规定。

8.2 数据解译

8.2.1 数据解译主要包括如下内容:

- a) 用于成果解释的雷达图像清晰、信噪比高, 解释成果应采用专业语言描述;
- b) 根据信号的同相轴及振幅、相位和频率等属性特征提取异常信号;
- c) 结合现场记录和调查资料, 排除干扰异常;
- d) 路基路面异常信号解释需结合路面变形、结冰情况、历史沉陷等调查资料及测区地质及天气资料;
- e) 路基路面内部异常体位置、范围和规模, 结合无异常雷达信号相邻测线雷达剖面图像对比分析确定;
- f) 雷达剖面图像上应标明路基路面内部异常信号的位置。

8.2.2 探地雷达数据分析流程包括异常目标提取、干扰异常识别、路基路面异常信号确定以及异常信号解释, 具体分析流程应符合 JGJ/T 437 中的规定。

9 报告编写

9.1 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、附件应目的明确、配置合理、美观整洁。

9.2 报告主要包括以下内容:

- a) 工程概况;
- b) 工作依据;
- c) 工作技术方法;
- d) 工作量完成情况及质量评述;
- e) 检测结果;
- f) 结论与建议;
- g) 附图、附表;
- h) 附表(附录 C)。

附 录 A
(规范性)
常见材料相对介电常数

常见道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	物质材料	相对介电常数
空气	1	沥青混凝土	3~10
淡水	81	水泥混凝土	4~15
冰	3~4	土	4~20
沥青	4~5	水泥	4~6
玄武岩	8~9	石灰岩	4~8

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，土工材料空隙与含水率计算可按照JTG 3430。

地方标准信息服务平台

附录 B
(规范性)
公路材料相对介电常数标定

B.1 金属薄板法

B.1.1 将三维探地雷达系统按照7.2a方式连接并预热。将长宽不小于 3×3 m，厚度不小于5 mm的金属板放置于待测道路，设定数据采集模式为常规采集模式，将雷达天线阵列悬空置于金属板上方测得金属板反射振幅 A_p 。将金属板移除，将雷达天线阵列悬空置于相同位置，设定数据采集模式为常规采集模式，天线阵列悬空置于金属板上方测得公路面层反射振幅 A_r 。

B.1.2 利用公式 (B.1)、(B.2) 计算公路面层材料相对介电常数。

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{1+R}{1-R} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$R = \frac{A_r}{A_p} \dots\dots\dots (B.2)$$

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。

B.1.3 金属薄板法仅适用于空气耦合探地雷达天线，且仅能测得公路面层材料相对介电常数。

B.2 钻芯实测法

B.2.1 将三维探地雷达系统按照7.2a的方式连接并预热。设定数据采集模式为常规采集模式，将雷达天线阵列置于待测道路，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描述的方法钻取公路路基路面芯样，量取面层、基层等厚度 d 。

B.2.2 电磁波在芯样内部传播双程时间 t 可直接从探地雷达图像获取，按照公式 (B.3) 可计算得到材料相对介电常数。

$$\epsilon_r = \left(\frac{0.3t}{2d} \right)^2 \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

t —— 双程旅行时间 (ns)；

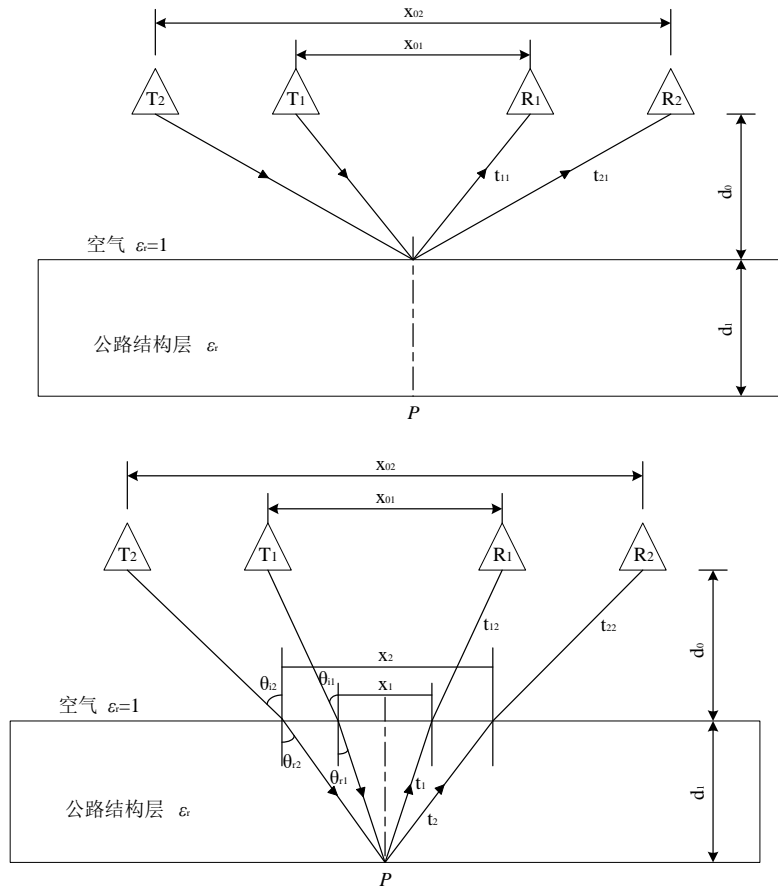
d —— 标定目标厚度 (cm)。

B.2.3 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。

B.3 共中点法

B.3.1 将三维探地雷达系统按照7.2a的方式连接并预热。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，进而计算公路结构层各层材料的介电常数。

B.3.2 共中点法测量公路路基路面介电常数示意图如图B.1所示。



图B.1 探地雷达共中点法测量介电常数示意图

公路路基路面相对介电常数计算见公式 (B.4)、(B.5)、(B.6)：

$$\epsilon_r = \frac{c^2(t_2^2 - t_1^2)}{x_2^2 - x_1^2} \dots \dots \dots (B.4)$$

$$t_1 = \Delta t_1 + \frac{\sqrt{4d_1^2 + x_{01}^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{01} - x_1)^2}}{c} \dots \dots \dots (B.5)$$

$$t_2 = \Delta t_2 + \frac{\sqrt{4d_1^2 + x_{02}^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{02} - x_2)^2}}{c} \dots \dots \dots (B.6)$$

式中：

Δt_1 ——雷达发射-接收天线对 T_1R_1 与发射-接收天线对 T_2R_2 测量的沥青路面顶部与底部波峰时间差；

Δt_2 ——雷达发射-接收天线对 T_1R_1 与发射-接收天线对 T_2R_2 测量的沥青路面顶部与底部波峰时间差；

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。

B.3.3 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。

