

团 体 标 准

T/JSCTS ×××—2021

公路路面探地雷达检测技术规程

Inspection technical regulations of ground penetrating radar for highway
pavement

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

2021-××-××发布

2021-××-××实施

江苏省综合交通运输学会 发布

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 基本要求..... 2

5 检测..... 4

6 分析与评价..... 4

附录 A（规范性） 检测记录表..... 8

附录 B（资料性） 典型雷达图像..... 10

附录 C（资料性） 检测报告..... 11

附录 D（规范性） 本规程用词说明..... 12

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。

为进一步规范我省公路路面探地雷达检测技术的程序和方法，科学分析与评价路面厚度、路面结构内部质量，在系列试验研究、试点工程以及广泛征求意见的基础上，参考国内相关标准，编制形成本文件。

本文件由江苏省综合交通运输学会提出并归口。

本文件起草单位：华设设计集团股份有限公司、江苏高速公路工程养护技术有限公司。

本文件主要起草人：汪春桃、俞先江、刘亚楼、王正、孙振锋、张文浩、卜勇、顾冕、冯梦溪、倪丹、魏玮、燕轲、祝争艳、马辉、吴昊、虞水。

公路路面探地雷达检测技术规程

1 范围

本文件规定了公路路面探地雷达检测的基本要求、检测、分析与评价等内容。

本文件适用于江苏省采用探地雷达进行的公路路面质量检测与评价，公路工程其他部位雷达检测可参照执行。

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。

JT/T 940 公路断面探伤及结构层厚度探地雷达

DGJ32/TJ79 雷达法检测建设工程质量技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

探地雷达

是一种能够发射和接收高频电磁波信号，利用介质对电磁波的反射特性，研究介质内部目标体特征的无损探测设备。

3.2

天线阵雷达

相同频率或不同频率的天线通过特定的天线合成器（雷达主机）组合到一起工作的雷达系统。

3.3

分辨率

分辨最小目标体特征的能力。

3.4

中心频率

天线通频带之间频率的算术平均。

3.5

时窗

探地雷达采集信号的时间范围。

3.6

采样率（样点数/道）

垂直于检测面方向一次扫描采集的信号点数。

3.7

相对介电常数

介质相对于真空的介电常数，以字母 ϵ_r 表示。

3.8

探测深度

雷达所能探测到的最大目标体信号的深度。

4 基本要求

4.1 一般规定

4.1.1 探地雷达检测公路路面时，应委托具有相应资质的第三方检测机构进行；检测人员应具备雷达检测所需的专业技术能力，经资格考核确认，持证上岗。

4.1.2 按本文件进行探地雷达检测，除应遵守本文件的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

4.2 仪器设备

4.2.1 雷达系统技术要求

探地雷达系统应符合以下规定：

- a) 具有产品合格证书，并在其检定有效期限内使用；
- b) 信噪比宜大于 120dB；
- c) A/D 转换位数不小于 16bit；
- d) 主机采样率应大于 128；
- e) 主机宜兼容所有频率的天线；
- f) 具有点测与连续测量功能；
- g) 具有手动或自动位置标记功能；
- h) 具有现场数据处理功能；
- i) 系统正常工作时，应满足《公路断面探伤及结构层厚度探地雷达》JT/T 940 中的相关规定。

4.2.2 设备维护

探地雷达设备维护应符合以下规定：

- a) 新购雷达仪器经过大修、长期停用后，投入正式使用前应重新检定；
- b) 雷达仪器在使用、运输和保管过程中应注意防水、防潮、防曝晒和防剧烈震动等。

4.3 检测环境

现场检测环境应满足以下要求：

- a) 检测区域表面无颗粒杂物或障碍物，检测表面平整；
- b) 检测区域表面宜保持干燥，相对湿度不大于 85%；
- c) 工作温度宜满足 $-15^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

4.4 检测参数

4.4.1 天线中心频率的选定

4.4.1.1 天线中心频率可由公式（1）选定：

$$f = \frac{150}{x\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

x ——分辨率(单位：m)；

ϵ_r ——介质的相对介电常数；

f ——天线中心频率（单位：MHz）。

4.4.1.2 天线中心频率亦可根据不同的探测深度查表 1 选定。

表 1 探测深度与中心频率对应关系

深度/m	中心频率/MHz
0.4	2000
0.6	1600
0.8	1200
1.0	900
1.5	600
2.0	400

4.4.1.3 天线中心频率的选定应在满足探测深度的前提下，使用高频天线，并考虑天线大小是否符合检测场地要求。

4.4.2 时窗的确定

时窗可由公式（3）确定：

$$w = 1.3 \times \frac{2h_{\max}}{v} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

w ——时窗（单位：ns）；

v ——雷达波在被测介质中的波速(单位：m/ns)；

h_{\max} ——最大探测深度(单位：m)。

4.4.3 采样率的选取

采样率可由公式（4）选取：

$$S_p \geq w \times f \times 10^{-8} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

S_p ——采样率。

4.5 内外业要求

- 4.5.1 现场检测开始前，应对检测路段进行现场踏勘，了解路况或施工现场条件，并收集已有的设计、施工、其他检测等基础资料。
- 4.5.2 雷达测线布置应根据检测的任务、要求、路况、现场条件等确定，主测线宜纵向布置在行车轮迹带上，根据需要可布置若干条辅助测线。
- 4.5.3 雷达图像处理前，应对现场记录逐一进行核实验收，发现错误时应及时补记和补测。
- 4.5.4 不使用测距轮时，应准确记录现场起终点里程桩号，在雷达图像上根据前进距离等距标记。

5 检测

5.1 检测步骤

- 5.1.1 组装雷达系统，将雷达天线与主机正确连接并安装牢固，检查确认雷达系统是否正常使用。
- 5.1.2 检测开始前，应对检测区域进行雷达波速校准，标定介质的相对介电常数；采用测距轮时，应进行距离标定。
- 5.1.3 打开数据采集软件，设置采样率、时窗、增益、测距轮分辨率等参数。
- 5.1.4 检测时，雷达天线沿测线方向匀速移动，移速宜为 5km/h~10km/h。
- 5.1.5 检测时，记录测线位置、编号、移动方向、起终点桩号、天线类型等，并随时记录对检测产生电磁影响的物体及其位置。
- 5.1.6 在场地条件允许情况下，宜使用天线阵雷达进行网格状扫描，多条测线辅助分析。

5.2 现场记录

- 5.2.1 每个记录文件应具有详细的现场记录信息：工程名称、时间、地点、起终点桩号、仪器型号、具体参数、操作人员等（见附录 A）。
- 5.2.2 现场记录图像应具有清晰的距离标记；波形清晰、可靠，初至波前段背景平静，能追索有效反射波；异常反映较完整，能达到预设的探测深度，有较高的信噪比，相邻记录道间的反射波形具有可比性。
- 5.2.3 同一记录图像剖面内的强干扰、工作不正常扫描数不得超过总扫描数的 10%。

5.3 安全措施

- 5.3.1 雷达系统运行过程中，操作人员应严格遵守相关安全操作规定。
- 5.3.2 处于路面交通正常通行等特殊条件时，应采取适当的交通管制及保护检测人员安全的相应措施。

6 分析与评价

6.1 雷达图像处理与解释

- 6.1.1 应使用正版软件或经过鉴定合格的软件进行雷达图像处理与解释。
- 6.1.2 图像处理前，应检查现场记录是否完整、清晰，剔除与检测目标无关的数据。

- 6.1.3 选择合适的滤波方式：包括低通、高通、带通滤波等。
- 6.1.4 选择合适的增益方式：包括线性增益、平滑增益、反比增益、指数增益、常数增益等。
- 6.1.5 根据检测的实际情况，选择性进行反滤波处理（反褶积处理）、偏移处理等。
- 6.1.6 雷达图像分析：
- 确定反射波组的界面特征；
 - 识别地表干扰反射波组；
 - 识别正常介质界面反射波组；
 - 确定反射层信息。
- 6.1.7 雷达图像解释：
- 结合多个相邻测线雷达图像，找到数据之间的相关性；
 - 结合检测区域表面情况，分析雷达图像；
 - 将现场检测雷达图像和经过验证的典型雷达图像（见附录 B）比对分析。

6.2 路面厚度分析

- 6.2.1 根据本文件第 6.1 条给出的雷达图像处理与解释步骤，确定路面结构分层界面。
- 6.2.2 通过钻孔取芯实测或在已知厚度部位，标定介质的相对介电常数。
- 6.2.3 芯样高度（或已知厚度） h 和电磁波双程传播时间 t 的关系，按公式（5）计算得到介质的相对介电常数。

$$\varepsilon_r = \frac{c^2}{v^2} = \frac{c^2 t^2}{4h^2} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- c ——电磁波在真空中的传播速度，通常取 0.3m/ns；
- t ——电磁波在路面中的双程传播时间（单位：ns）；
- h ——芯样厚度检测值（单位：m）。

- 6.2.4 根据确定的分层界面，以及电磁波在路面中的双程传播时间 t 和介质的相对介电常数 ε_r ，按公式（6）、公式（7）计算得到路面厚度 H ：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \dots\dots\dots (6)$$

$$H = \frac{v \cdot t}{2} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- H ——路面厚度检测值（单位：m）。

- 6.2.5 条件允许时，宜采用其他检测方法对检测结果进行校核，如采用取芯法验证。

6.3 路面结构内部质量分析

- 6.3.1 路面结构内部质量分析时，应满足以下两个条件：

- 被检测区域至少有一个相对平整的检测面；
- 检测区域应完全覆盖某个被怀疑的病害区域。

- 6.3.2 根据探测深度等选用合适中心频率的天线以及适宜的雷达通道数，并按本文件第 5.1 条、6.1 条分别进行数据采集、图像处理与解释。

- 6.3.3 单通道雷达检测病害：

- a) 根据典型雷达图像确定病害类型及位置；
 - b) 检测过程中，对出现病害的检测区域应进行测线加密，通过多条测线数据结合进行解释。
- 6.3.4 天线阵雷达检测病害：
- a) 分析比较相同深度多组不同雷达图像的异常特征确定病害类型及位置；
 - b) 对疑似目标物周围进行高密度扫描，采用多通道数据结合进行解释。
- 6.3.5 病害平面图的绘制：
- a) 按本文件附录 A 记录病害检测结果；
 - b) 根据病害的位置、分布，参照检测区域总平面图，绘制病害平面图，并标注里程桩号；
 - c) 小范围区域检测时，宜在图上详细标注病害位置、埋深等信息。
- 6.3.6 在条件允许的情况下，选取部分病害位置采用取芯法进行验证。
- 6.3.7 路面结构内部病害主要分为松散（疏松、离析、破碎）、层间粘结不密实、富水、脱空等类型。病害特征图像描述及分级依据见表 2。

表 2 路面结构层病害分类分级

病害类型	分级	病害特征图像描述及分级依据
松散 (疏松、离析、破碎)	轻	病害区域的雷达反射波振幅较周围介质反射波振幅大，波形存在散乱现象，病害下方的道路结构层界面同相轴存在轻度缺失。
	中	病害区域的雷达反射波振幅远大于周围介质反射，波形基本散乱，病害下方的道路结构层界面同相轴部分缺失。
	重	病害区域的雷达反射波振幅远大于周围介质反射，波形完全散乱无序，病害下方的道路结构层界面同相轴完全消失。
层间粘结不密实	--	雷达反射波同相轴发生错断，并产生两段平行于不密实区域的同相轴，反射波振幅大。
富水	轻	雷达反射波振幅与初始雷达发射电磁波反相，振幅较周围介质反射波振幅小，频谱上部分高频信号被吸收截断，主要表现为中低频谱。
	重	雷达反射波振幅与初始雷达发射电磁波反相，振幅较周围介质反射波振幅小得多，频谱上大部分高频信号被吸收截断，主要表现为低频谱。
脱空	--	数据剖面上会形成强反射，反射波振幅很大，由于脱空区域边缘的多次反射和绕射，会形成双曲线型反射弧和绕射波尾。

6.4 路面结构内部质量评价

6.4.1 检测路段的路面结构内部质量评价指数按公式（8）计算：

$$S = 100 - \frac{\sum_{i=1}^{i_0} L_i (1 + G_{jk}) C_j W_j}{L} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- S——检测路段的质量评价指数；
- L_i ——检测路段区域内某类病害的长度（m）；
- L——检测路段总长度（m）；
- C_j ——对应病害类型的评价常数，见表3；
- W_j ——对应病害类型的权重，见表3；
- G_{jk} ——对应病害类型的分级系数，见表4。

表3 路面结构层病害评价系数

病害类型	评价常数 C	权重 W	雷达测量参数			
			介电常数 ϵ	速度 v	反射系数 R	衰减系数 β
松散 (疏松、离析、破碎)	15	2	√	√	√	√
层间粘结不密实	15	2	√		√	√
富水	20	3	√		√	√
脱空	30	4	√		√	√

表4 路面结构层病害分级系数

病害类型	程度分级	分级系数 (G)	描述
松散 (疏松、离析、破碎)	轻	0.2	细集料开始散失
	中	0.4	细集料大量散失, 粗集料开始散失
	重	0.6	粗集料散失
层间粘结不密实	-	0.4	-
富水	轻	0.4	层内介质湿润
	重	0.8	层内出现积水
脱空	-	1.0	-

6.4.2 路面结构内部质量评价可按表5的规定划分为优、良、中、次、差五个等级。

表5 路面结构内部质量评价等级

等级	优	良	中	次	差
评价指数 (S)	$S \geq 90$	$80 \leq S < 90$	$70 \leq S < 80$	$60 \leq S < 70$	$S < 60$

附录 A
(规范性)
检测记录表

表 A.1 结构层厚度检测记录表

检测单位名称:

记录编号:

工程名称									
工程部位/用途									
样品信息									
试验检测日期				试验条件					
检测依据				判定依据					
主要仪器设备名称及编号									
段落桩号	路面设计厚度 (cm)	路面实测厚度 (cm)						描述	仪器参数
		(测线位置 1)	(测线位置 2)	(测线位置 3)	(测线位置 4)	(测线位置 5)	(测线位置 6)		
备注									

检测:

记录:

复核:

日期:

年

月

日

表 A.2 病害记录表

检测单位名称:

记录编号:

工程名称							
工程部位/用途							
样品信息							
试验检测日期				试验条件			
检测依据				判定依据			
主要仪器设备名称及编号							
段落桩号	测线位置	病害分类	病害分级	病害位置	病害深度 (m)	病害雷达图像	仪器参数
备注							

检测:

记录:

复核:

日期:


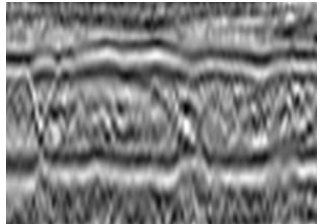
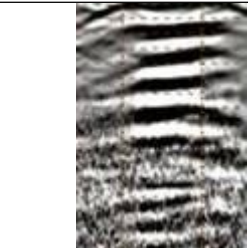
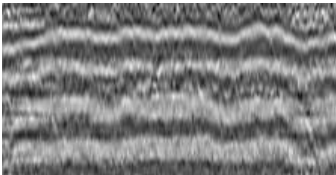
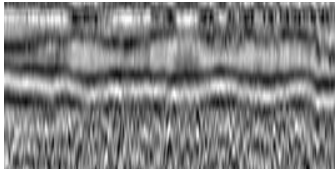
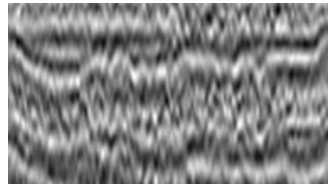
年

月

日

附 录 B
(资料性)
典型雷达图像

表 B.1 典型雷达图像

典型雷达图像	雷达图像异常特征描述	结构层内部介质属性
	<p>波形同相轴近水平, 具有连续性和相似性, 沿同相轴的振幅段稳定。</p>	<p>结构层界面或分层施工层界面</p>
	<p>两侧波形同相轴近水平分布, 但出现同相轴错动或中断, 其错动中断间距不大于 10cm。</p>	<p>基层内部垂向裂隙</p>
	<p>局部出现较强的反射波或明显出现反射波同相轴上凸现象, 波形较长或出现多次反射波现象。</p>	<p>结构层内局部脱空或松散</p>
	<p>局部出现反射波, 波长较长, 幅度衰弱, 呈云状。</p>	<p>局部富含水</p>
	<p>局部出现近水平状的反射波带, 或位于界面反射波处出现明显呈强反射波带。</p>	<p>结构层局部松散、离析或沿界面的松散夹层</p>
	<p>沿测线剖面上呈高倾斜角度的反射波同相位分布。</p>	<p>结构层分期施工铺筑接缝 粘合不佳</p>

附 录 C
(资料性)
检测报告

- C.1 检测报告宜采用《公路水运试验检测数据报告编制导则》JT/T 828 规定的格式。
- C.2 检测报告签字页，人员信息应填写完善，签名齐全。
- C.3 检测报告不限于以下内容：
 - a) 项目概况：工程概况、检测目的、检测日期等；
 - b) 检测依据；
 - c) 检测人员与设备；
 - d) 检测内容与方法：检测参数、检测方法、测线布置等；
 - e) 检测数据分析：路面厚度、病害类型及位置等；
 - f) 检测结论：路面结构内部质量评价等；
 - g) 有关建议：病害处治建议等；
 - h) 附图与附表。
- C.4 检测报告应突出重点、文理通顺、表达清楚、结论正确。

附 录 D
(规范性)
本规程用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- a) 表示很严格，非这样做不可的用词：
正面词采用“必须”；
反面词采用“严禁”。
- b) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：
正面词采用“应”；
反面词采用“不应”或“不得”。
- c) 表示稍有选择，在条件许可时首选这样做的用词：
正面词用“宜”或“可”；
反面词采用“不宜”。

条文中指定按其他有关规程、规程执行时，写法为“应符合的规定”。非必须按所指定的规程、规程或其他规定执行时，写法为“可参照”。
