

团 体 标 准

T/JSCTS 11—2022

公路路面探地雷达检测技术规程

Code of inspection practice for ground penetrating radar on highway
pavement

2022-4-6 发布

2022-6-1 实施

江苏省综合交通运输学会 发布

TJCTS 11-2022

目 次

前言.....	III
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.....	5
附录 A（规范性） 相对介电常数标定.....	8
附录 B（规范性） 检测记录表.....	9
附录 C（规范性） t_a/\sqrt{n} 值.....	11
附录 D（资料性） 典型雷达图像.....	12

TJCTS 11-2022

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：俞先江、张文浩、王正、卜勇、汪春桃、刘亚楼、孙振锋、顾冕、燕轲、冯梦溪、祝争艳、魏永高、马辉、彭湘桂、吴昊、虞水、徐兵、李志宇、靳羽、谢强、朱超月、武坤。

TJCTS 11-2022

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、分析与评价方法。

本文件适用于公路路面应用探地雷达进行路面结构层厚度和内部状况的检测与评价,其他道路路面应用探地雷达可参照使用。

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。

JJG(交通)124 公路路面探伤及结构层厚度探地雷达

JT/T 940 公路断面探伤及结构层厚度探地雷达

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 ground penetrating radar

一种能够发射和接收高频电磁波信号,通过观测反射电磁波的时间滞后及强弱特征,分析确定目标体特性的电磁探测设备。

3.2

雷达天线 radar antenna

用来发射和接收雷达电磁波的设备。

[来源: JGJ/T 456-2019, 2.1.4]

3.3

中心频率 center frequency

发射或接收信号最高频率与最低频率的几何平均值。

3.4

相对介电常数 relative dielectric constant

介质相对于真空的介电常数之比,以字母 ϵ_r 表示。

3.5

探测深度 detection depth

探地雷达所能探测到的目标体信号的有效深度。

3.6

时窗 range

探地雷达采集信号的时间范围。

3.7

采样率 sampling rate

垂直于检测面方向一次扫描采集的信号点数。

3.8

松散 loose

密实度明显低于周边结构体的现象。

3.9

层间粘结不良 poor bonding between layers

路面结构层之间粘结性能较低的现象。

3.10

富水 water-rich

路面结构内部局部区域含水量明显大于其周边的现象。

3.11

脱空 cavity

路面结构层之间或与路基之间分离出一定距离的现象。

4 基本要求

4.1 一般规定

4.1.1 探地雷达检测路面结构时，检测及分析人员应具备雷达检测所需的专业技术能力。

4.1.2 现场检测开始前，应对检测路段进行现场踏勘，了解现场工作条件，并收集设计、施工、养护等基础资料。

4.1.3 探地雷达测线布置应根据检测的任务要求、路况条件等确定，主测线宜纵向布置。

4.1.4 检测过程时，应准确记录现场起终点桩号和特征点桩号，并在雷达图像上标记。

4.2 检测方案

检测方案宜包括下列内容：

- a) 项目概况；
- b) 检测依据；
- c) 检测内容与方法；
- d) 检测人员与仪器设备；
- e) 重点难点分析及应对措施；
- f) 组织及保证措施；
- g) 拟提交的成果资料。

4.3 仪器设备

4.3.1 探地雷达系统技术要求

探地雷达系统技术要求应符合下列规定：

- a) 具有产品合格证书，检校有效期有效；
- b) 信噪比大于 120dB；
- c) A/D 转换位数不小于 16 位；
- d) 主机采样率不小于 128；

- e) 扫描速率不低于 100 扫/秒；
- f) 其他应满足 JT/T 940 的相关规定。

4.3.2 设备维护

探地雷达设备维护应符合下列规定：

- a) 新购或经过大修、长期停用的探地雷达，投入使用前应按 JJG(交通)124 的相关规定进行检校；
- b) 探地雷达在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。

4.4 检测环境

现场检测环境应满足下列要求：

- a) 检测区域表面平整、无障碍物、无明显强磁干扰；
- b) 检测区域表面应保持干燥，环境相对湿度不大于 85%；
- c) 路面温度为 $-15^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

4.5 检测参数

4.5.1 天线中心频率的选定

4.5.1.1 天线中心频率可按公式(1)计算选定：

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

式中：

f ——天线中心频率，单位为兆赫兹（MHz）；

x ——垂直分辨率，单位为米（m）；

ϵ_r ——介质的相对介电常数，无量纲；常见介质的相对介电常数见表1。

表1 常见介质的相对介电常数和电磁波在介质中的波速

参数	常见介质								
	空气	水	铁	土(干)	土(湿)	沥青	干 混凝土	湿 混凝土	聚氯 乙烯
介质的相对介电常数 ϵ_r	1	81	300	3~5	4~40	3~5	4~10	10~20	3~5
电磁波在介质中的波速 v	0.3	0.033	—	0.13~ 0.18	0.05~ 0.15	0.13~ 0.18	0.09~ 0.15	0.07~ 0.09	0.13~ 0.18

4.5.1.2 天线中心频率亦可根据不同的探测深度查表2选定。

表2 天线中心频率与探测深度对应关系

中心频率 MHz	探测深度 m
≥ 2000	≤ 0.4

表2 天线中心频率与探测深度对应关系（续）

中心频率 MHz	探测深度 m
≥1600	≤0.6
≥1200	≤0.8
≥900	≤1.0
≥600	≤1.5
≥400	≤2.0

4.5.1.3 天线中心频率的选定应在满足探测深度的前提下，优先使用高频天线，并符合检测场地要求。

4.5.2 时窗的确定

时窗可按公式（2）计算确定：

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

式中：

w ——时窗，单位为纳秒（ns）；

h_{max} ——最大探测深度，单位为米（m）；

v ——电磁波在介质中的波速，单位为米每纳秒（m/ns），常见介质的电磁波波速见表1。

4.5.3 采样率的选取

采样率可按公式（3）计算选取：

$$S_p \geq 3wf \times 10^{-2} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

S_p ——采样率，无量纲；

w ——时窗，单位为纳秒（ns）；

f ——天线中心频率，单位为兆赫兹（MHz）。

5 检测

5.1 检测准备

5.1.1 将雷达主机与天线正确连接并安装牢固，组装探地雷达系统，检查确认系统是否正常工作。

5.1.2 打开采集软件，设置采样率、时窗、增益等参数，对检测区域进行电磁波波速校准；根据已知厚度值，按附录A 标定介质的相对介电常数；使用测距轮时，应进行距离标定。

5.2 现场检测

5.2.1 路面结构层厚度检测宜每车道布设不少于1条测线；路面结构内部缺陷检测宜每车道布设不少于2条测线。

5.2.2 按附录 B 记录工程名称、起终点桩号、测线位置、时间、仪器型号、具体参数、产生电磁影响的物体及其位置。

5.2.3 雷达天线沿测线方向宜匀速移动，优先采用测距轮模式，测试过程对特征点桩号或位置及时进行确认；采用车载雷达时，检测速度应与雷达的扫描速率相匹配。

5.2.4 探地雷达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；异常波反映较完整，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。

5.2.5 探地雷达图像出现异常时，应及时分析原因。若存在可识别干扰源，应予记录；若不能识别干扰源，在排除路面内部缺陷的前提下，应进行重复检测。

5.2.6 当检测区域未能完整显示路面内部缺陷时，应进行追踪探测直至正常、无缺陷区域。

5.2.7 需要确定路面内部缺陷平面范围时，宜进行网格状扫描。

5.3 安全措施

5.3.1 探地雷达检测过程中，检测人员应严格遵守相关安全操作规定。

5.3.2 在正常通行路段检测时，按相关规定设置或配置安全措施，保证作业区域和检测人员的安全。

5.3.3 宜避免在路面交通繁忙时间段或拥堵路段等特殊情况下进行检测。

5.3.4 采用车载雷达时，检测车辆应设置醒目的警示标志，确保行驶安全。

6 分析与评价

6.1 数据处理与分析

6.1.1 数据处理前，应检查测试数据是否完整、图像是否清晰，提取有效的检测数据。

6.1.2 选择合适的滤波方式：包括低通、高通、带通滤波等。

6.1.3 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。

6.1.4 根据数据滤波和增益情况，选择是否需要反滤波处理（反褶积处理）、偏移处理等。

6.1.5 数据分析按下列原则进行：

- a) 识别干扰反射波组；
- b) 确定反射波组的界面特征；
- c) 识别正常介质界面反射波组；
- d) 确定反射层信息。

6.2 路面结构层厚度分析

6.2.1 根据探地雷达图像，按 6.1 进行处理与分析，确定路面各结构层的分层界面。

6.2.2 根据确定的分层界面，以及电磁波在介质中的双程传播时间 t 和波速 v ，按公式（4）计算路面结构层厚度 H ：

$$H = \frac{1}{2}vt \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

式中：

H ——路面结构层厚度值，单位为厘米 (cm)；

v ——电磁波在介质中的波速，单位为米每纳秒 (m/ns)；

t ——电磁波在介质中的双程传播时间，单位为纳秒 (ns)。

6.2.3 路面结构层厚度分析时，宜每 10m 计算一个检测值；对于新建公路路面，统计单元长度宜为 1000m/车道；对于既有路面，统计单元长度宜为 100m/车道。

6.2.4 路面结构层厚度代表值应以每条测线上每个统计单元按公式（5）计算：

$$H_L = \bar{H} - t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (5)$$

式中：

H_L ——厚度代表值（算术平均值的下置信界限），单位为厘米（cm）；

\bar{H} ——厚度平均值，单位为厘米（cm）；

S ——标准差；

n ——检测值数量；

t_α —— t 分布表中随测点数和保证率（或置信度 α ）而变的系数， t_α/\sqrt{n} 取值按附录C执行。

6.3 路面结构内部状况分析与评价

6.3.1 路面结构内部状况分析

6.3.1.1 根据现场记录及探地雷达图像，确定路面结构内部缺陷类型。典型雷达图像可参见附录 D。

6.3.1.2 需要时，可选取部分缺陷位置采用取芯法等方法进行验证。

6.3.1.3 路面结构内部缺陷分为松散、层间粘结不良、富水、脱空；缺陷特征图像描述及分级依据见表 3。

表 3 路面结构内部缺陷分类分级

缺陷类型	分级	图像描述及分级依据	缺陷特征
松散	轻	缺陷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，缺陷下方的道路结构层界面同相轴存在轻度缺失。	细集料开始散失
	中	缺陷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，缺陷下方的道路结构层界面同相轴部分缺失。	细集料大量散失，粗集料开始散失
	重	缺陷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，缺陷下方的道路结构层界面同相轴完全消失。	粗集料散失
层间粘结不良	—	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。	层内介质湿润
	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。	层内出现积水
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，会形成上下两个明显的反射界面。	—

6.3.1.4 路面结构内部状况平面图的绘制按下列要求进行：

- 按附录 B 记录检测结果；
- 根据缺陷的位置、分布，参照检测区域平面图，绘制缺陷平面图，并标注桩号；

c) 小范围检测时,宜在图上详细标注缺陷位置、埋深等信息。

6.3.2 路面结构内部状况评价

6.3.2.1 每条测线上每个评价单元的路面结构内部状况指数按公式(6)计算:

$$S = 100 - \frac{\sum_{i=1}^{i_0} L_i (1 + G_{jk}) C_j W_j}{L} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

S ——评价单元的路面结构内部状况指数;

i_0 ——评价单元内缺陷类型数;

L_i ——评价单元内某类缺陷的长度,单位为米(m);

G_{jk} ——对应缺陷类型的分级系数,见表4;

C_j ——对应缺陷类型的评价系数,见表4;

W_j ——对应缺陷类型的权重,见表4;

L ——评价单元长度,单位为米(m);对于新建公路路面, L 宜为1000m/车道;对于既有路面, L 宜为100m/车道。

表4 缺陷评价系数及分级系数

缺陷类型	程度分级	评价常数 C_j	权重 W_j	分级系数 G_{jk}
松散	轻	15	2	0.2
	中			0.4
	重			0.6
层间粘结不良	—	15	2	0.4
富水	轻	20	3	0.4
	重			0.8
脱空	—	30	4	1.0

6.3.2.2 评价单元的路面结构内部状况可按表5划分为优、良、中、次、差五个等级。

表5 路面结构内部状况评价等级

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

6.4 检测报告

检测报告宜包括下列内容:

- 项目概况:工程概况、检测目的、检测日期等;
- 检测依据;
- 检测内容与方法:检测参数、检测方法、测线布置等;
- 检测人员与仪器设备;

- e) 数据分析：路面结构层厚度、缺陷类型及位置等；
- f) 检测结论：路面结构内部状况评价等；
- g) 有关建议：缺陷处治建议等；
- h) 附图（包括缺陷位置雷达图像）与附表等。

附 录 A
(规范性)
相对介电常数标定

- A.1 标定方法包括预埋金属薄板法和钻孔实测法等，标定点数不应少于 3 个。
- A.2 路面结构层材料或含水率变化较大时，应适当增加标定点数。
- A.3 标定记录中界面反射信号应清晰、可靠，标定目标体的厚度宜与检测结构层厚度相一致。
- A.4 标定结果 ε_r 按公式 (A.1)、公式 (A.2) 计算。

$$\varepsilon_r = \frac{c^2}{v^2} = \frac{c^2 t^2}{4h^2} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$v = \frac{2h}{t} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

ε_r ——介质的相对介电常数，无量纲；

c ——电磁波在真空中的传播速度，通常取0.3m/ns；

v ——电磁波在介质中的波速，单位为米每纳秒(m/ns)；

h ——已知厚度值，单位为米 (m)；

t ——电磁波在介质中的双程传播时间，单位为纳秒 (ns)。

附录 B
(规范性)
检测记录表

表B.1~表B.2规定了路面结构层厚度检测、路面结构内部状况检测的记录格式。

表 B.1 路面结构层厚度检测结果记录表

检测单位名称:

记录编号:

工程名称									
工程部位/用途									
检测依据				判定依据					
试验检测日期				检测环境					
主要仪器设备名称及编号				仪器设置参数					
统计单元号	检测值段落桩号	路面设计厚度/cm	路面实测厚度/cm						备注
			测线 1	测线 2	测线 3	测线 4	测线 5	...	
1									
	厚度平均值 \bar{H}								
厚度代表值 H_L									
:									

检测:

记录:

复核:

日期:

年

月

日

表 B.2 路面结构内部状况检测结果记录表

检测单位名称:

记录编号:

工程名称								
工程部位/用途								
检测依据				判定依据				
试验检测日期				检测环境				
主要仪器设备名称及编号				仪器设置参数				
编号	评定单元起讫桩号	测线位置	缺陷分类	缺陷分级	缺陷位置	缺陷深度/m	缺陷长度/m	路面结构内部状况指数 S
1			松散					
			层间粘结不良					
			富水					
			脱空					
2			松散					
			层间粘结不良					
			富水					
			脱空					
3			松散					
			层间粘结不良					
			富水					
			脱空					
备注								

检测:

记录:

复核:

日期:

年

月

日

附 录 C
(规范性)
 t_{α}/\sqrt{n} 值

表C.1 规定了 t_{α}/\sqrt{n} 值。

表 C.1 t_{α}/\sqrt{n} 值

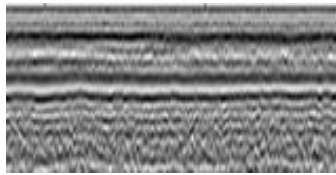
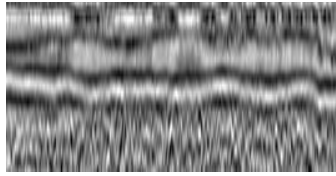
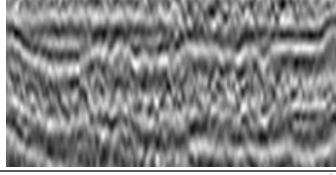
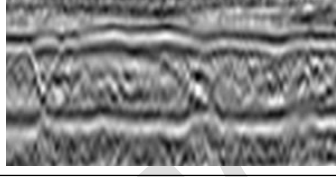
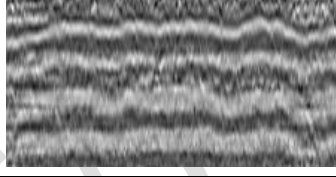
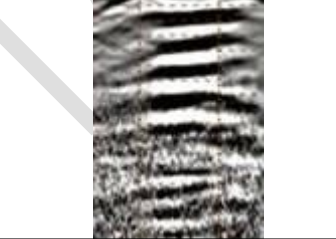
n	保证率			n	保证率		
	99%	95%	90%		99%	95%	90%
2	22.501	4.465	2.176	21	0.552	0.376	0.289
3	4.021	1.686	1.089	22	0.537	0.367	0.282
4	2.270	1.177	0.819	23	0.523	0.358	0.275
5	1.676	0.953	0.686	24	0.510	0.350	0.269
6	1.374	0.823	0.603	25	0.498	0.342	0.264
7	1.188	0.734	0.544	26	0.487	0.335	0.258
8	1.060	0.670	0.500	27	0.477	0.328	0.253
9	0.966	0.620	0.466	28	0.467	0.322	0.248
10	0.892	0.580	0.437	29	0.458	0.316	0.244
11	0.833	0.546	0.414	30	0.449	0.310	0.239
12	0.785	0.518	0.393	40	0.383	0.266	0.206
13	0.744	0.494	0.376	50	0.340	0.237	0.184
14	0.708	0.473	0.361	60	0.308	0.216	0.167
15	0.678	0.455	0.347	70	0.285	0.199	0.155
16	0.651	0.438	0.335	80	0.266	0.186	0.145
17	0.626	0.423	0.324	90	0.249	0.175	0.136
18	0.605	0.410	0.314	100	0.236	0.166	0.129
19	0.586	0.398	0.305	>100	$\frac{2.3265}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.6449}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.2815}{\sqrt{n}}$
20	0.568	0.387	0.297				

注：保证率选取，高速公路和一级公路的基层、底基层为99%，面层为95%；其他公路的基层、底基层为95%，面层为90%。

附 录 D
(资料性)
典型雷达图像

表D.1 描述了典型雷达图像的路面结构内部状况。

表 D.1 典型雷达图像

典型雷达图像	雷达图像描述	路面结构内部状况
	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。	分层界面
	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。	松散（轻）
	沿测线剖面上呈高倾斜角度的反射波同相位分布。	松散（中）
	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。	层间粘结不良
	局部出现反射波，波长较长，幅度衰弱，呈云状。	富水
	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。	脱空或松散（重）
注：雷达天线中心频率为400MHz。		