



T/CECS G XXXX: 2021

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路结构层厚度三维探地雷达快速检测 规程

Specification for rapid detection of highway structural layer
thickness using 3D ground penetrating radar

征求意见稿

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设协会标准

公路结构层厚度三维探地雷达快速检测规程

Specification for rapid detection of highway structural layer thickness
using 3D ground penetrating radar

主编单位：哈尔滨工业大学

批准部门：中国工程建设标准化协会

实施日期：2021 年 XX 月 XX 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2020 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2020]023 号）的要求，由哈尔滨工业大学承担《公路结构层厚度三维探地雷达快速检测规程》（以下简称“本规程”）的编制工作。

编制组在总结现有三维探地雷达公路检测研究成果及应用的基础上，经过广泛调查研究，充分吸收国内外相关标准的先进技术，并广泛征集行业内外的意见和建议，完成本规程的编写工作。

本规程分为 7 章，主要内容包括：1 总则，2 术语与符号，3 技术要求，4 数据采集，5 数据处理与评价，6 检测报告编制与提交，附录 A 标定记录表，附录 B 三维探地雷达现场记录表，附录 C 公路结构层厚度统计表。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由北京建筑大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或王大为（地址：黑龙江省哈尔滨市南岗区黄河路 73 号；邮编：150090；电子邮箱：dawei.wang@hit.edu.cn），以便修订时研用。

主 编 单 位：哈尔滨工业大学

参 编 单 位：香港理工大学

欧美大地仪器设备中国有限公司

山东省交通科学研究院

北京市道路工程质量监督站

广西交科集团有限公司

内蒙古自治区交通建设工程质量监测鉴定站

长安大学

辽宁省交通科学研究院有限责任公司

广州肖宁道路工程技术研究事务有限公司

北京工业大学

东南大学

扬州得路达交通科技有限公司

主 编：王大为

主要参编人员：冷 真 张袁备 谭忆秋 汤伏蛟 韦金城 薛忠军 熊剑平
张洪伟 王朝辉 白 旭 朱建平 李伟雄 李兴海 邢 超
洪 斌 侯 越 董 侨 陆国阳 吕浩天 叶泽文 杨 旋
叶呈森 黄志勇 王颀奇

主 审：张肖宁

参与审查人员：刘 凯 罗 桑 田春艳 张 翥 王随原 徐永丽 周长俊
李 峰

参 加 人 员：

目 次

1 总则.....	1
2 术语与符号	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	2
3 技术要求	4
3.1 设备要求.....	4
3.2 采集参数设定.....	5
4 数据采集	8
4.1 准备工作.....	8
4.2 雷达系统标定.....	8
4.3 现场作业流程.....	9
4.4 数据采集模式.....	10
4.5 介电常数数据采集.....	11
4.6 层厚数据采集.....	11
4.7 数据采集质量控制.....	12
5 数据处理与评价	13
5.1 一般规定.....	13
5.2 介电常数数据分析.....	13
5.3 层厚数据分析.....	17
6 检测报告编制与提交	19
6.1 报告编制.....	19
6.2 成果报告提交.....	19
附录 A 雷达系统标定记录表	20
附录 B 三维探地雷达现场记录表	21
附录 C 公路结构层厚度统计表	22

1 总则

1.0.1 为规范、指导当前国内三维探地雷达快速检测公路结构层厚度，保证公路结构层厚度检测质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于二级及二级以上公路结构层总厚度以及面层、基层、底基层等各层厚度的检验，可作为施工过程控制、交竣工工程质量评价和既有工程养护维修评价的技术依据。

1.0.3 应用三维探地雷达进行公路结构层厚度检测除应遵照本标准的规定外，尚应符合有关法律、法规及国家、行业现行有关标准规定。

1.0.4 本标准不适用于材料过度潮湿或饱和、连续配筋混凝土以及富铁元素集料等介电常数较高的材料铺筑的道路。

1.0.5 应用本标准要从检测区实际情况出发，合理布置测线，合理选择天线阵列几何尺寸、频率范围、采集模式、采集参数等指标。

1.0.6 本标准采用实时动态载波相位差分（RTK）技术和满足层厚检测要求的采集、处理、解释技术。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 三维探地雷达 3D Ground Penetrating Radar

采用雷达收发天线阵列技术，通过电磁波面积采集，可实现三维检测（包括横向剖面、纵向剖面、水平剖面）的一种探地雷达。

2.1.2 探地雷达天线 GPR Antenna

由发射、接收天线组成，能够发射并接收高频电磁波信号，具有一定分辨率和较强抗干扰能力的装置。

2.1.3 水平分辨率 Horizontal Resolution

同一深度内，区分两平行目标体的最小值。

2.1.4 垂直分辨率 Vertical Resolution

深度方向区分两目标体的最小值。

2.1.5 时窗 Time Window

探地雷达信号采集电磁波传播的双程时间范围。

2.1.6 相对介电常数 Relative dielectric Constant

又称相对电容率（Relative permittivity），是外加电场与介质中电场的比值，代表电介质的极化程度。

2.1.7 共中心点 Common Midpoint

将三维探地雷达收发天线以一定距离按中心线对称排列的一种采集方式。

2.2 符号

f_c ——天线中心频率

BW——天线带宽

x ——最小分辨率

ε_r ——公路结构层平均相对介电常数

c ——电磁波在空气中的传播速度

v ——电磁波在道路材料介质中的传播速度

T ——时窗宽度

K ——时窗加权系数

t ——双程旅行时间

Δt_1 、 Δt_2 ——雷达天线 1 与天线 2 测量的沥青路面顶部与底部波峰时间差

H ——公路结构层厚度

H_m ——目标探测深度

d ——标定目标体厚度

3 技术要求

3.1 设备要求

3.1.1 三维探地雷达系统配置包括雷达主机、阵列天线、采集触发系统、精准定位系统、控制中心等，能够将三维探地雷达图像、坐标位置、路表特征、标记等多种数据信息同步采集，加入到雷达数据中。

3.1.2 三维探地雷达系统应每 3 年进行检验、校准和保养，检验项目及性能指标应符合 JT/T 940 出厂检验的相关规定。

条文说明

三维探地雷达系统属于高精度设备，各类高精度电子部件在使用过程中可能受环境温度、元件老化、反复振动等因素的影响，导致设备不满足检测精度要求，因此需要定期对三维探地雷达系统进行检验、校准和保养。

3.1.3 定位设备选择厘米级分辨率 RTK 测量接收机，其性能指标应符合 CJJ/T73 的相关规定。

条文说明

定位设备的精度等级是三维探地雷达系统的精度之一，雷达数据采集过程中车速较快，采用高精度定位设备能够精准定位各采样点的实际位置，满足工程需要。

3.1.4 三维探地雷达设备主要性能参考 JT/T 940，应满足以下要求：

- a) 天线通道数不少于 10 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 0.1 %；
- d) 最小垂直分辨率不大于 0.5 ns；
- e) 系统测量精度要求如表 3.1 所示。

表 3.1 系统测量精度要求

测量深度	测量误差允许范围
$H < 100 \text{ mm}$	$\pm 3 \text{ mm}$
$H \geq 100 \text{ mm}$	$\pm (3\% H) \text{ mm}$

条文说明

现行《公路断面探伤及结构层厚度探地雷达》JT/T 940 规范中主要规定了二

维结构层厚度探地雷达设备的主要参数要求,以上主要针对三维探地雷达设备采集效率、系统精度、探测分辨率等方面进行相关参数要求。其中天线通道数不少于 10 道,能保证单次数据采集效率;A/D 转换位数不应小于 16bit,距离标定误差 不大于 0.1%能保证数据采集精度要求;分辨率、层厚、测量误差要求能保证层厚检测精度。

3.2 采集参数设定

3.2.1 雷达天线参数

天线参数应根据工作目的、探测深度以及探测分辨率等因素综合分析选定,可参考以下选择条件:

- 1) 当多种频率的天线均能满足分辨率条件时,宜选择频率相对低的天线;
- 2) 当多种频率的天线均能满足探测深度条件时,宜选择频率相对高的天线。

a) 脉冲式探地雷达

若天线为脉冲式,可按式(1)计算大致确定天线中心频率:

$$f_c = \frac{7500}{x\sqrt{\epsilon_r}} \tag{1}$$

式中: f_c ——天线中心频率 (MHz);

x ——最小分辨率 (cm);

ϵ_r ——公路结构层平均相对介电常数。

b) 频率步进式探地雷达

若天线为频率步进式,可按式(2)计算大致确定天线带宽:

$$BW = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}x} \tag{2}$$

式中: BW——天线带宽 (GHz);

x ——最小分辨率 (cm);

c ——电磁波在空气中的传播速度,一般取 30 (cm/ns);

ϵ_r ——公路结构层平均相对介电常数。

当公路结构层相对介电常数不宜确定时,天线中心频率或天线带宽宜参考表 3.2 规定。

表 3.2 天线参数选定表

探测深度 (m)	最小分辨率 (cm)	中心频率 (MHz)	带宽 (GHz)
----------	------------	------------	----------

<0.4	1.0	2000~3000	2.0~3.0
0.4~0.7	1.6	1300~2000	1.5~2.3
0.7~1	2.5	900~1300	1.0~1.8

条文说明

图 3.2.1 为不同频率天线探测深度与分辨率的关系图。高频天线探测深度浅，分辨率高；低频天线探测深度深，分辨率低。

脉冲天线具有主频，即中心频率。主频为最大有效频率与最小有效频率的平均值，而频带宽（Band Width）为最大有效频率与最小有效频率之差。通常高频天线带宽大，而低频天线带宽窄。因此在一定深度条件下，能够保证分辨率近似不变，但随着探测深度的增加，较高频率的电磁波能量耗散，分辨率逐渐降低；频率步进天线发射电磁波频率带宽较大，从低频到高频能量近似均匀分布，因此随着探测深度的增加，高频部分电磁波能量逐渐耗散，但仍然可以有足够的带宽，保证其探测分辨率。

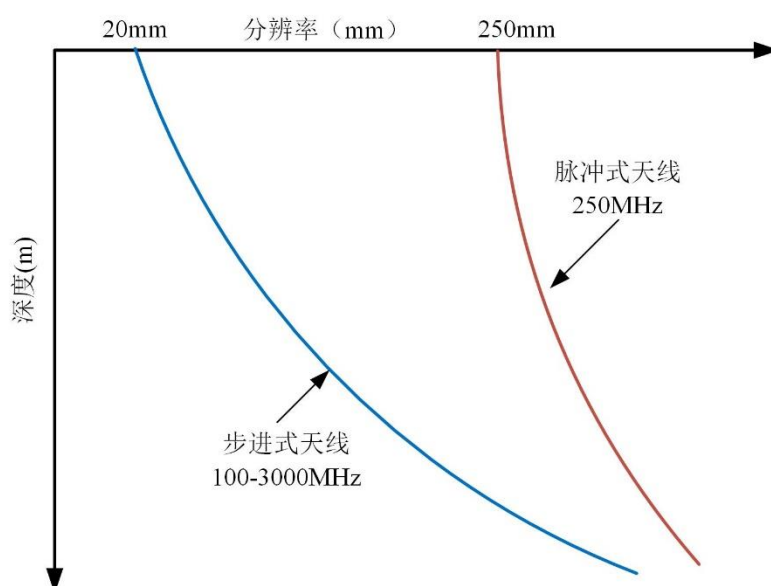


图 3.2.1 不同天线频率探测深度与分辨率关系示意图

3.2.2 时窗宽度由式（3）确定：

$$T = K \frac{2H_m}{v} \quad (3)$$

式中：T——时窗宽度（ns）；

K——时窗加权系数，取 2~2.5，充分考虑目标结构层深度的变化；

H_m ——目标探测深度（cm）；

v ——电磁波在道路材料介质中的传播速度（cm/ns）。

条文说明

公路结构层厚度受公路病害、地层沉降等因素影响，为了保证采集数据深度完全包含公路结构层厚度信息，采用 2~2.5 的时窗加权系数较为合理。

4 数据采集

4.1 准备工作

4.1.1 在雷达数据采集前应搜集以下资料：

- a) 测区公路结构层设计厚度、道路材料信息、道路设计标高、道路养护记录等道路工程相关资料；
- b) 测区气象条件、交通量等相关资料；
- c) 测区相关的岩土工程、工程地质、水文地质、地球物理资料；
- d) 测区内既有的探测情况或与探测工作有关的其他资料。

条文说明

公路结构层厚度受公路设计标准、施工质量、使用年限、养护情况、交通量等因素影响较大，因此在三维探地雷达检测前收集相关资料有利于更好地确定雷达数据采集参数，准确检测公路结构层厚度。

4.1.2 在资料搜集的基础上，应对检测区域进行现场勘查，主要包括：

- a) 了解测区地形、交通、通信等工作环境条件；
- b) 了解雷达典型干扰源的主要分布；
- c) 根据已有资料和现场勘查情况布置测区检测线路、检测速度等参数；
- d) 检验核实已搜集资料的完备性、真实性和有效性，评估现场作业风险。

条文说明

探地雷达属于高精度仪器设备，并且受电磁波信号干扰明显，因此提前勘查测区工作条件、干扰源分布能够提前排查数据采集不利条件，提高数据采集质量。

由于雷达数据采集过程大多采取不封道实时采集方式，因此需要提前规划检测线路，排查可能影响数据采集的路面病害隐患、潜在安全隐患等。

4.2 雷达系统标定

4.2.1 数据采集前，应对测距仪标定，标定距离不小于 50 m，误差不大于 0.1 %。

4.2.2 数据采集前，应对道路结构层相对介电常数或电磁波传播速度进行标定，标定方法包括预埋金属薄板法和钻孔实测法，每种待测公路结构不应少于 3 点。当道路结构层含水量变化较大、道路路表病害较多时，应适当增加标定点数。

4.2.3 标定相对介电常数或电磁波传播速度时，采集模式应采用测距轮触发

模式或点测模式，相对介电常数标定应满足下列条件：

- a) 标定记录中界面反射信号应清晰、准确；
- b) 标定目标体的厚度不宜小于 5 cm，宜与检测结构层厚度相一致。

标定结果应按式（4）、（5）计算：

$$\varepsilon_r = \left(\frac{0.3t}{2d} \right)^2 \quad (4)$$

$$v = \frac{2d}{t} \quad (5)$$

式中： ε_r ——相对介电常数；

v ——电磁波在介质中的传播速度（cm/ns）；

t ——双程旅行时间（ns）；

d ——标定目标体的厚度（cm）。

4.2.4 标定结束后应及时汇总填写测距误差、相对介电常数、电磁波速度、实测厚度、厚度误差等参数，表格形式及内容应符合附录 A 规定。

条文说明

公路结构层厚度检测最重要的评价参数是定位及层厚精度，对测距仪进行标定能够确保定位精度；对层厚信息进行标定能够确保层厚精度和检测数据的真实性、有效性。

4.3 现场作业流程

4.3.1 对检测路段进行清扫，保证路面干净整洁，无大块凸起物。按照设备厂商提供的安装方法将雷达主机、阵列天线、采集触发设备、定位设备等安装牢固，检查连接线安装无误后开机预热，预热时间不得少于厂商规定的时间。

4.3.2 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，进行测距仪标定，设定常规采集模式或共中心点采集模式。

4.3.3 根据阵列天线宽度、检测目的、测区地形及工程地质情况提前布置测线，应做到全覆盖式检测。测线应沿车道前进方向布设，测线间距应不大于三维雷达天线阵列 0.5 倍宽。

4.3.4 操作人员应记录检测起点与终点位置，采集过程中应记录路面病害信息及位置，如路面坑槽、沉陷、修补等。

4.3.5 采集结束后，操作人员检查数据文件，包含公路结构层厚度数据和共

中心点数据。要求文件完整，内容正常，否则重新检测。

条文说明

章节 4.3 整理汇总了三维雷达设备现场作业基本流程、要求及注意事项。

4.4 数据采集模式

三维探地雷达天线阵列具有多对信号发射-接收器，可以通过改变发射-接收器的信号排布方式设置天线阵列为常规采集模式和共中心点（CMP）采集模式。

4.4.1 常规采集模式

设置天线阵列接收器均接收来自相邻的两个发射器的电磁波反射信号，即“一发双收”状态，则为常规采集模式，具体信号收发示意图如图 4.1 所示。常规采集模式需要人工设置材料相对介电常数，单次可采集与收发天线对通道数相同的雷达数据。

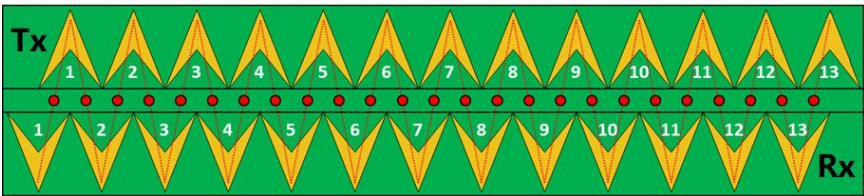


图 4.1 三维探地雷达常规采集模式信号收发示意图

4.4.2 共中心点（CMP）采集模式

设置天线阵列发射-接收器信号中点通过同一几何中心，则为共中心点（CMP）采集模式，具体信号收发示意图如 4.2 所示，共中心点（CMP）采集模式可设置多个几何中心，无需设置材料相对介电常数，单次可采集与设置几何中心数量相同的雷达数据。该方法适用于单通道信号采样数较高且沥青层厚度不宜过薄的测试场景。

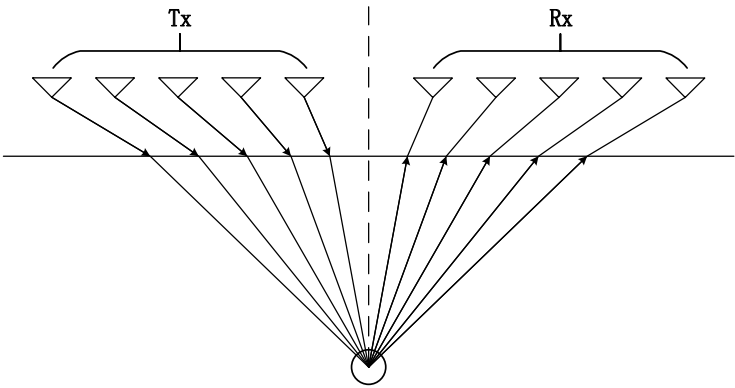


图 4.2 三维探地雷达共中心点（CMP）采集模式信号收发示意图

4.5 介电常数数据采集

道路材料相对介电常数随着路面结构设计厚度、集料类型、沥青产地、混合料类型、施工水平、密度以及湿度等的变化而不同。因此，介电常数测定应保证准确、连续、快速。公路结构层材料介电常数可通过钻芯取样法和共中点法进行采集。进行施工过程控制、既有工程养护维修评价时，宜采用钻芯取样法与共中点法相结合的方式；进行交竣工工程质量评价时，宜采用共中点法。具体采集方法如下：

4.5.1 钻芯取样法

将雷达天线设定为常规采集模式，数据采集过程中，在采集软件上做标记，在路面上找出雷达天线中心所对应的位置，做好标记，在标记处钻取芯样并量测芯样高度，将芯样高度与电磁波双程走时数据进行对比，得出材料相对介电常数 ϵ_r 。

条文说明

钻芯取样法主要参照《公路路基路面现场测试规程》JTG 3450-2019 中 T0912 挖坑和钻芯测试路面厚度方法。

4.5.2 共中点法

相比于二维探地雷达，三维探地雷达具有多对信号发射、接收器，因此可设置天线发射/接收为共中点模式，并通过选用发射-接收器对路面介电常数进行计算。

将雷达天线设定为共中心点采集模式，前进方向沿道路走向，地面所对应雷达天线共中心点处为介电常数数据采集点。

条文说明

表面发射法是二维探地雷达相对介电常数检测方法，该方法基于路面材料无损、均匀假定，且只能测定路面面层介电常数，适用范围窄，一般用于新建公路交竣工工程质量评价。基于多组收发天线探地雷达的共中点法无需假定路面材料无损、均匀，能够有效测定各结构层介电常数，适用范围广。

4.6 层厚数据采集

可设置天线阵列为常规采集模式或共中心点采集模式进行层厚数据采集。当

发射的电磁波通过路面层时，波在层界面被折射和反射，并被天线接收。接收到的信号由探地雷达系统根据振幅和双向传播时间进行记录，原理如图 4.4 所示。

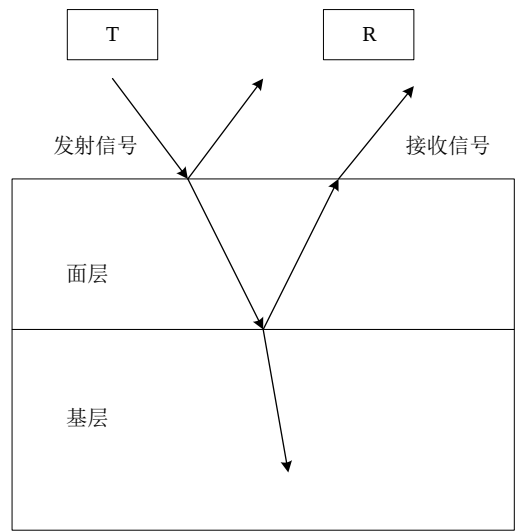


图 4.4 雷达波在道路结构层中的传播示意图

4.7 数据采集质量控制

- 4.7.1 数据采集时出现信号中断情况，需重新采集或补测；
- 4.7.2 采集数据每个通道剖面上不应出现连续坏道，不应出现某通道无图像；
- 4.7.3 采集数据的信噪比应满足数据处理、解释需要；
- 4.7.4 雷达测线束间距应满足全覆盖要求；
- 4.7.5 雷达承载车的行驶速度应严格控制在最大采集速度的 80 %以内；
- 4.7.6 同一测段介电常数数据采集和层厚数据采集过程尽量保证工况相同。

条文说明

探地雷达数据质量是保证厚度检测精度的重要环节，4.7 整理汇总了三维雷达设备数据采集质量控制要求。

5 数据处理与评价

5.1 一般规定

5.1.1 处理原始数据前，应进行数据整体质量评判，原始数据应符合下列要求：

- a) 测试数据所包含的信息应能覆盖整个检测区域；
- b) 里程标记准确无误；
- c) 测试数据的有效信号深度应包含需要检测的路面结构层厚度；
- d) 测试数据的信噪比应满足处理需要，一般不低于 120 dB；
- e) 不合格原始数据不得参与处理与解释。

5.1.2 数据处理应符合下列规定：

- a) 位置标记应准确、无误；
- b) 处理后的信号不应失真；
- c) 处理后的检测图像应与原始观测图像的形态与位置基本保持一致；
- d) 处理后的目标层位线同相轴清晰，具有较高的信噪比，应能正确反映相邻层位间的关系。

5.1.3 数据处理、分析应与数据质量评判同时进行，发现问题后立即采取以下补救措施：

- a) 使相邻测线的数据具有一定的一致性；
- b) 使重复观测的数据具有较高的一致性。

5.2 介电常数数据分析

同一测点分别采取钻芯取样法和共中点法测定相对介电常数值。当二者测量差值小于等于 10 %，推荐采用共中点法测定路面材料相对介电常数；当二者测量差值大于 10 %，推荐采用钻芯取样法测定路面材料相对介电常数。

5.2.1 钻芯取样法数据分析

根据钻芯取样可获得公路结构层厚度 H ，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，按照式（6）可计算得到材料介电常数。

$$\varepsilon_r = \frac{c^2 t^2}{4H^2} \quad (6)$$

式中： ε_r ——材料相对介电常数；

H ——公路结构层厚度（cm）；

t ——双程旅行时间（ns）；

c ——电磁波在空气中的传播速度（cm/ns），取 30 cm/ns。

常见材料的电磁属性，见表 5.1。

表 5.1 常见材料的电磁属性

材料	相对介电常数	波速（cm/ns）
空气	1	30
水	81	3
冰	3~4	15~17
金属	10^6	≈ 0
干砂	3~6	12~17
湿砂	15~35	5~8
干沥青混凝土	3~7	11~17
湿沥青混凝土	6~15	8~12
干水泥混凝土	4~10	9~15
湿水泥混凝土	10~20	7~9

介电常数测定段长度一般为 20 km，同一测定段内芯样个数不少于 4 个，将测定段内所有芯样测得的介电常数取平均值作为该测定段的介电常数代表值，保证介电常数测定结果的代表性和准确性。

条文说明

钻芯取样法芯样个数参考《公路路基路面现场测试规程》JTG 3450-2019 中 T 0913 短脉冲雷达测试路面厚度方法。由于三维探地雷达拥有比短脉冲雷达精度高，因此芯样个数要求更为严格。

5.2.2 共中点法数据分析

由于公路结构层各层材料具有不同的介电常数，因此具有不同的导电性，导电性的差异影响了电磁波的传播速度，一般用共中心点模式计算电磁波在路面内部的传播时间差，进而计算公路结构层各层材料的介电常数。

共中心点法测量介电常数示意图如图 5.1 所示。

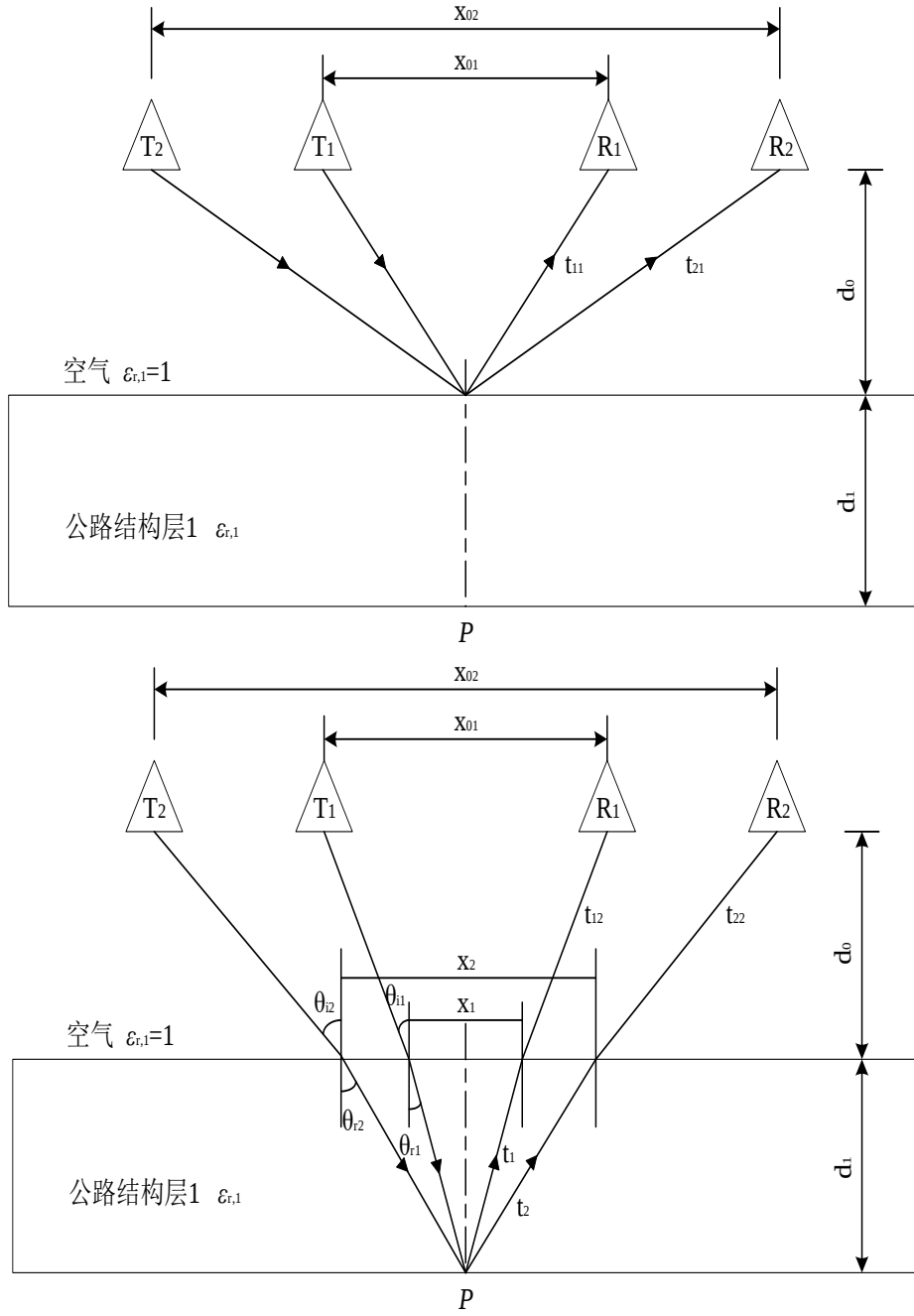


图 5.1 探地雷达共中心点法测量介电常数示意图

介质的相对介电常数计算见式 (7)、(8)、(9)：

$$\varepsilon_{r,1} = \frac{c^2(t_2^2 - t_1^2)}{x_2^2 - x_1^2} \quad (7)$$

$$t_1 = \Delta t_1 + \frac{\sqrt{4d_1^2 + x_{01}^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{01} - x_1)^2}}{c} \quad (8)$$

$$t_2 = \Delta t_2 + \frac{\sqrt{4d_1^2 + x_{02}^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{02} - x_2)^2}}{c} \quad (9)$$

式中： $\varepsilon_{r,1}$ ——介质的相对介电常数；

Δt_1 、 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，其他参数如图 5.1 所示。

天线阵列设置为共中心点采集模式，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，如图 5.2 所示。

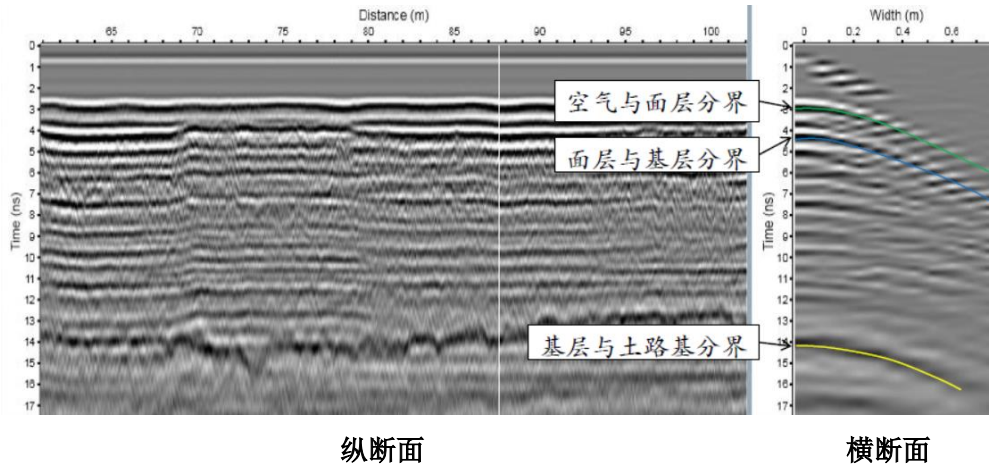


图 5.2 雷达图像分界线

根据共中点法原理与计算公式可计算各结构层延行车方向各点的相对介电常数，分析结果如图 5.3 所示。

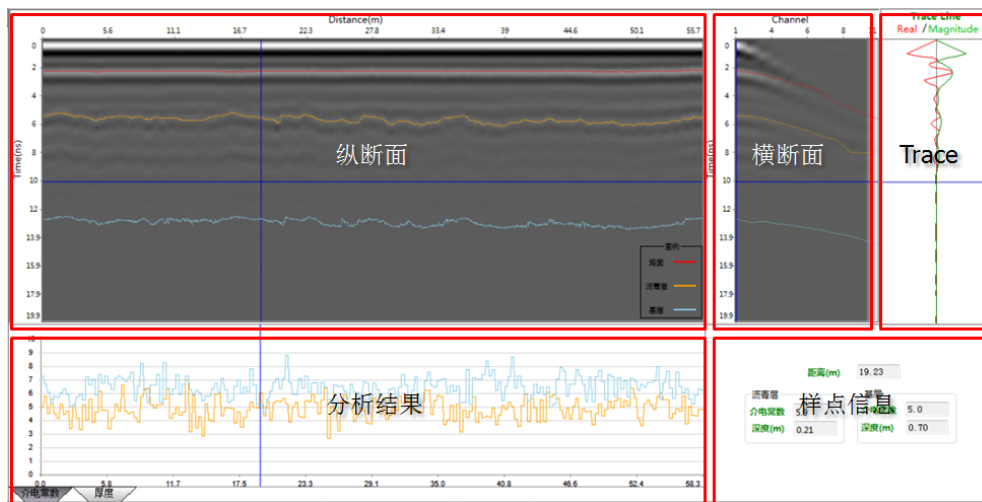


图 5.3 共中点法分析结果

在测区内，每 20 km 车道作为一个测定段，将测定段内的介电常数取平均值作为该测定段该条车道的介电常数代表值。

条文说明

共中点法数据处理计算量大、过程复杂。天线阵列通道数较多时（大于 12

个), 可设置将天线收发模式设为多中心点, 使结果更加精确。5.2.2 介绍了共中点法的基本原理和主要公式, 实际运用共中点法分析数据时可在 5.2.2 的基础上进行改进、拓展。

5.3 层厚数据分析

由雷达波识别软件识别各层分界线, 根据确定的分层界面得到电磁波在路面结构层中双程传播时间 t 和材料相对介电常数 ϵ_r , 根据式 (10)、(11) 可求出路面各结构层厚度 H :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

$$H = \frac{tv}{2} \quad (11)$$

式中: H ——公路结构层厚度 (cm);

v ——电磁波在道路材料介质中的传播速度 (cm/ns)。

5.3.1 资料解译前宜准备以下资料:

- a) 处理后的三维探地雷达数据、测线束坐标数据;
- b) 三维探地雷达探测现场记录表;
- c) 前期收集的各类资料。

5.3.2 资料解释应在掌握测区内物理参数的基础上, 按下列原则进行:

- a) 参与解释的探地雷达图像应清晰;
- b) 应根据现场记录分析可能存在的干扰体位置与探地雷达异常剖面图谱的对应关系, 准确区分有效异常与干扰异常;
- c) 应准确读取目标层位的双程旅行时间;
- d) 应结合层厚、坐标以及设计厚度等信息, 绘制层厚分布云图, 以直观表征测试路段厚度整体分布情况, 具体示例如图 5.4 所示。

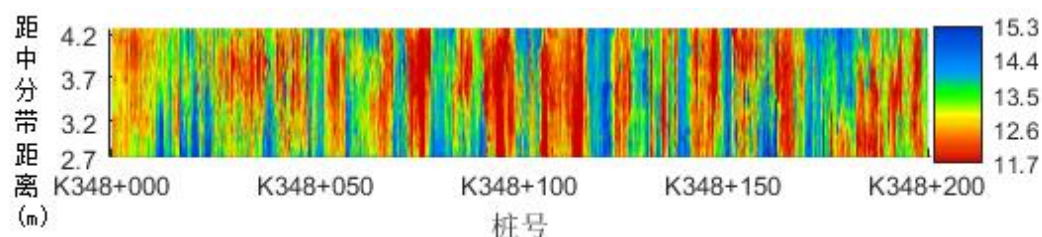


图 5.4 层厚分布云图

5.3.3 雷达数据图像若出现以下识别特征时，对应区域定义为病害区，不作为层厚评判依据：

- a) 同相轴不连续，波形杂乱，不规则；
- b) 同相轴弯曲或出现错动；
- c) 层间振幅出现突变，多为振幅增大；
- d) 路表同相轴凹凸不平。

条文说明

层厚数据分析的重点工作是进行各层位线识别，当公路结构层附近存在病害、干扰源时，应识别干扰层位线因素。因此在进行层厚数据分析时，做出以上要求。

6 检测报告编制与提交

6.1 报告编制

6.1.1 报告编写应根据任务书、设计书及有关标准进行；

6.1.2 成果报告应在系统收集、分析、整理工作区的岩土工程、工程地质、水文地质、地球物理等有关资料的基础上编写；

6.1.3 成果报告文字应章节合理、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；

6.1.4 报告附图、附件目的明确、配置合理、美观整洁。

6.2 成果报告提交

6.2.1 文档类成果：

a) 技术设计书；

b) 成果报告。

6.2.2 数据类成果：

a) 三维探地雷达原始探测数据及最终数据处理文件，包含测量里程、层厚纵向平均数据、层厚横向平均数据、层厚变异系数等；

b) 层间连接较差处复测数据文件，包含层间振幅峰值、内窥镜示意图等。

6.2.3 图件类成果：

a) 测区控制点与测线束位置图；

b) 公路结构层厚度平面分布图；

c) 公路结构层层间连接情况分布图；

d) 成果解释图册。

附录 A 雷达系统标定记录表

工程名称：_____ 探测地点：_____

仪器型号：_____ 天线频率范围（MHz）：_____ 编号：_____

道路名称		标定距离（m）		实测距离（m）	显示距离（m）	误差（%）
编号	层位	双程旅行时间（ns）	实测厚度（m）	电磁波速度（m/s）	相对介电常数	厚度误差（%）

操作人：_____ 记录人：_____ 日期：第 页/共 页

附录 B 三维探地雷达现场记录表

工程名称：_____ 探测地点：_____

仪器型号：_____ 天线频率范围（MHz）：_____ 编号：_____

测线束 编号	测线束 方向	道路名称	测线束相对位置 描述	测线束起终点		测线束长度 (m)	备注
				起点	终点		

操作人：_____ 记录人：_____ 日期：第 页/共 页

附录 C 公路结构层厚度统计表

工程名称: _____ 道路名称: _____

仪器型号: _____ 天线频率范围 (MHz): _____ 编号: _____

公路平均介电常数: _____ 公路结构层平均厚度 (m): _____

[illegible]

操作人：

记录人:

日期: 第 页/共 页