

DB 37

山 东 省 地 方 标 准

DB37/T 4945—2025

公路沥青路面施工均匀性检测 红外热像 仪法和三维探地雷达法

Detection for uniformity of highway asphalt pavement construction—Infrared
thermography method and three dimensional (3D) ground-penetrating radar method

2025 – 10 – 15 发布

2025 – 11 – 15 实施

山东省市场监督管理局 发 布

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。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由山东省交通运输标准化技术委员会归口。

公路沥青路面施工均匀性检测 红外热像仪法和三维探地雷达法

1 范围

本文件描述了利用红外热像仪进行沥青路面施工温度均匀性检测和利用三维探地雷达进行公路沥青路面压实及厚度均匀性检测的方法。

本文件适用于公路新建和改、扩建工程沥青路面施工均匀性检测。

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。

JTG 3450—2019 公路路基路面现场测试规程

JTG/T E61 公路路面技术状况自动化检测规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

均匀性检测 uniformity detection

采用特定设备与方法，对沥青路面施工过程中不同部位的温度、压实度及厚度等特性或性能参数一致性的检查与测试。

3.2

标准检测区域 standard detection area

在施工均匀性检测过程中，所设定的具有规定长度与宽度的独立矩形检测单元。

4 沥青路面施工温度均匀性检测

4.1 原理

采用红外热像仪法检测沥青路面施工温度均匀性，原理为基于物体表面温度与其红外辐射能量之间的相关性，通过光学系统采集特定区域内物体表面的红外辐射信息，经过信号处理技术生成热图像，以直观方式展示施工过程中沥青路面表层温度分布，分析评价沥青路面施工温度均匀性。

4.2 仪器设备

4.2.1 红外热像仪

红外热像仪应定期检查、校准和保养，应满足以下要求：

- 测量范围：最高温度不低于 300 ℃；
- 热灵敏度：不小于 0.03 ℃@30 ℃；
- 精度：不低于 ±1 ℃；

——视域：不小于 22° （竖向） $\times 17^{\circ}$ （横向）。

4.2.2 施工温度均匀性定量分析软件

施工温度均匀性定量分析软件应具有以下功能：

- 红外图像导入功能，双点矫正、盲点去除及直方拉伸等预处理功能；
- 自动阈值选取、矩阵二值化等图像分割功能；
- 环境温湿度、高度校正等后处理功能；
- 将图像温度场导出为表格或文本格式的输出功能。

4.3 检测步骤与要求

4.3.1 准备工作

准备工作按以下步骤进行：

- a) 检测前应搜集并记录路面结构及现状、原材料及配比、施工方法及机械，检测时天气、温度、湿度、风力、风向等气象信息，以及其他检测有关资料；
- b) 将待检区域划分为若干标准检测区域，标准检测区域横向宜覆盖待测路段整个横断面，横断面过宽时宜等分分段，且不大于 3 段，标准检测区域纵向长度宜为横向长度的 1 倍~3 倍；
- c) 准确记录检测时间、施工步骤节点和检测区域位置，以及红外热像仪位置、发射率、拍摄角度等参数信息；
- d) 开机预热，按照设备说明书进行仪器调试校准；
- e) 按以下步骤及要求完成红外热像仪温度准确性标定：
 - 1) 每次检测之前，在现场选定不少于 3 个标志物体，使用红外热像仪与插入式温度计或非插入式红外温度计进行温度准确性验证，确保误差不大于 5%；
 - 2) 对同一目标区域进行重复性验证，测试次数不小于 5 次，变异系数不大于 5%，如不满足要求，修改发射率等参数，重新进行温度准确性验证，直到满足为止。

4.3.2 标准检测区域图像准确性标定

标准检测区域图像准确性标定按以下步骤进行：

- a) 进行标定的标准检测区域不少于 3 个；
- b) 利用卷尺或测距轮测量标准区域边界，精度至 0.1 m，标准检测区域边界可布置定位锥筒或其他明显定位标志；
- c) 架设红外热像仪，并固定于三角支架上，平行移动三角支架并调整拍摄角度，使得待标定的标准检测区域全部在红外图像之内，宜占据图像可用区域的 70% 以上。

4.3.3 检测过程

检测过程按以下步骤进行：

- a) 在摊铺过程中，运输车向摊铺机卸料时，检测整个料车中的温度场；
- b) 摊铺温度每车检测一次，红外图像应覆盖螺旋布料器及部分新铺路面；
- c) 在碾压过程中，温度均匀性检测应涵盖初压、复压及终压全过程，可固定同一标准检测区域，检测不同碾压阶段的温度场，亦可采取均匀法、随机法、连续法等方式检测同一碾压阶段不同检测区域温度场，终压结束后，最终温度均匀性检测应覆盖整幅路面；
- d) 检测时采用红外热像仪对准测试的区域，以温度场图片形式保存数据，同时记录最高温度和最低温度；
- e) 检测过程中，图片中不应出现与待检测路面无关的人、物及其阴影等干扰；

- f) 检测过程中红外热像仪的高度、摄像头角度及拍摄参数应保持不变，如改变，重新记录并进行标准检测区域图像准确性验证。

4.4 数据处理

4.4.1 检测工作结束之后，应备份原始检测数据，并根据现场检测工作记录核实原始检测数据的有效性、完整性。

4.4.2 原始数据为包括温度场信息的 8 位或 16 位的单通道或三通道图片形式，以及与之对应的可见光三通道图片，图片文件名应包含检测地点、车道、施工步骤、时间等信息。

4.4.3 原始数据通过软件分割、预处理、校正后以表格或文本格式输出图像温度场数据。

4.4.4 计算测试结果平均值及标准差，并按照 3 倍标准差方法进行异常值处理，舍弃平均值左右 3 倍标准差范围以外的实测值，然后再重新计算整理。

4.4.5 绘制温度场云图，按照公式（1）计算温度极差，按照公式（2）及公式（3）分别计算温差系数、变异系数，按照公式（4）计算低温区域面积系数，按照公式（5）计算低温区域分布系数。

$$R = T_{\max} - T_{\min} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

R ——分析区域内的温度极差，单位为摄氏度（℃）；

T_{\max} ——分析区域内的路表最高温度，单位为摄氏度（℃）；

T_{\min} ——分析区域内的路表最低温度，单位为摄氏度（℃）。

$$TI = \frac{R}{\bar{T}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

TI ——分析区域内的路表温差系数；

\bar{T} ——分析区域内的路表平均温度，单位为摄氏度（℃）。

$$TI_i = \frac{T_{\max} - T_i}{\bar{T}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

TI_i ——分析区域内的任意 i 点路表温度变异系数；

T_i ——分析区域内的任意 i 点路表温度，单位为摄氏度（℃）。

$$AI_{LT} = 100 \times \frac{\sum_{i=1} w_i \cdot A_i}{A} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

AI_{LT} ——分析区域内的低温区域面积系数；

A_i ——红外图像中第 i 类温差系数的总面积，单位为平方米（ m^2 ）；

A ——红外图像总面积，单位为平方米（ m^2 ）；

w_i ——第 i 类温差系数的面积权重，取值见表1；

I ——温度不均匀标准的第 i 温差段。

表1 沥青路面温度不均匀程度及权重表

类别	温差系数	温度不均匀程度	权重大小
1	<5%	无	0
2	5%~8%	轻度	0.5
3	8%~14%	中度	0.7
4	>14%	重度	1
对于检测温度低于 JTG F40—2004 中 5.2.2 中相应工序所要求的最低温度的, 权重均按照第 4 类取 1			

$$DI_{LT} = 100 \times \frac{\sum_{j=1} \omega_j A_j}{A} \dots\dots\dots (5)$$

式中：
 DI_{LT} ——分析区域内的低温区域分布系数；
 A_j ——红外图像中第j类温差系数的总面积，单位为平方米（m²）；
 ω_j ——第j类温差系数的面积权重，可参照表2取值。

表2 分散度权重赋值表

类别	温差系数	低温区域块数			
		1 块	2 块~3 块	4 块~5 块	≥6 块
1	<5%	0	0	0	0
2	5%~8%	0.5	0.35	0.25	0.15
3	8%~14%	0.7	0.49	0.35	0.21
4	>14%	1	0.7	0.5	0.3
对于检测温度低于 JTG F40—2004 中表 5.2.2 中相应工序所要求的最低温度的, 权重均按照第 4 类取值					

5 沥青路面施工压实及厚度均匀性检测

5.1 原理

5.1.1 采用三维探地雷达法检测沥青路面施工压实及厚度均匀性，原理为基于电磁波的传播特性，通过分析高频电磁波在沥青路面表面反射信号同金属板反射信号的比例，计算路表的介电常数，进而利用沥青路面的压实度与其介电常数之间的正相关关系间接评估压实均匀性。

5.1.2 基于电磁波的传播特性，通过分析高频电磁波在沥青路面表面反射信号与折射信号，得到路面各层的介电常数，结合电磁波在介质中的传播速度计算各结构层厚度，进而评估沥青厚度均匀性。

5.2 仪器设备

5.2.1 三维探地雷达系统

- 三维探地雷达系统应符合以下规定：
- a) 应按照使用说明进行三维探地雷达系统的检验、校准；
 - b) 雷达天线可选用脉冲式或频率步进式空气耦合天线，单独进行沥青路面施工压实均匀性检测时，宜选用高频雷达天线，脉冲式雷达中心频率不应小于 1.3 GHz。与厚度均匀性同时检测或单独进行厚度均匀性检测时，天线中心频率或天线带宽取值见表 3；

表3 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

c) 当进行厚度均匀性检测时，时窗宽度由公式（6）确定：

$$T = K \frac{2H_m}{v} \dots\dots\dots (6)$$

- 式中：
- T ——时窗宽度，单位为纳秒（ns）；
 - K ——时窗加权系数，取2~2.5，宜充分考虑目标结构层深度的变化；
 - H_m ——目标探测深度，单位为厘米（cm）；
 - v ——电磁波在道路材料介质中的传播速度，单位为厘米每纳秒（cm/ns）。
- d) 采样间隔根据需要设定，宜不大于 0.15 m。

5.2.2 三维探地雷达定位设备

可选择厘米级分辨率实时动态载波相位差分（RTK）测量接收机，其性能指标应符合JJG/T E61的相关规定。

5.2.3 其他设备

标定金属板应采用方形铁板或铜板，表面平整，面积不小于0.01 m²；50 m卷尺等。

5.3 检测步骤及要求

5.3.1 准备工作

准备工作按以下步骤进行：

- a) 在雷达数据采集前应搜集：
 - 道路工程相关基本资料；
 - 测区气象条件、交通量等相关资料；
 - 测区内既有的探测情况或与探测工作有关的其他资料。
- b) 对检测区域进行现场勘查，并制定检测方案，主要包括：
 - 测区地形、交通、通信等工作环境条件；
 - 雷达典型干扰源的主要分布；
 - 路面状况，注意路面潮湿状况下不宜检测，路面积水状况下不应检测；
 - 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；
 - 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，测线应沿车道前进方向布设并实现全覆盖，测线间距不应大于三维雷达天线阵列宽度的0.5倍。
- c) 对检测路段进行清扫，保证路面干燥整洁，无成片积水区域，无大块凸起物；
- d) 按设备说明书规定进行开机预热。

5.3.2 雷达系统标定

雷达系统标定按以下步骤进行：

- a) 数据采集前，进行距离标定，标定距离不小于 100 m，误差不大于 0.1%；
- b) 压实均匀性检测时雷达系统标定还包括：
 - 1) 数据采集前，应进行金属板标定，可采用时间模式，将雷达中心固定于金属板正上方，采集时间不少于 5 s；亦可采用距离轮触发模式，使雷达中心匀速驶过金属板上方，行驶速度不应大于 10 km/h；
 - 2) 采集结束后，进行压实度标定，建立压实度与介电常数之间的关系。压实度可通过钻芯测试或无核密度仪测试进行定点测试，测试过程符合 JTG 3450 的规定。测试点数钻芯法不小于 3 个，无核密度仪法不小于 9 个，测试点位应具有代表性，宜覆盖所有测试车道，可在测试范围内采用均匀法、随机法选取，亦可选取目测路面离析处，并记录所选点位精确位置。
- c) 厚度均匀性检测时雷达系统标定还包括，采集结束后，进行介电常数标定，采用钻芯测试进行定点测试，每种待测结构不少于 3 点。采集模式应采用测距轮触发模式或点测模式，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，标定记录中界面反射信号应清晰、准确。

5.3.3 检测过程

三维探地雷达法沥青路面施工压实及厚度均匀性检测过程中，压实均匀性检测可单独进行，也可与厚度均匀性检测同时进行，检测过程按以下步骤进行：

- a) 探地雷达系统试运行，将采集模式设定为常规采集模式，设定雷达参数并记录，并进行测距仪标定；
- b) 进行金属板标定并单独储存；
- c) 按照检测方案进行全覆盖检测，每条侧线应单独储存并记录文件名及起终点和检测方向，操作人员密切关注实时三维地质雷达图像及检测路面情况，对特征信息及异常进行记录，记录表见附录 A；
- d) 采集结束后，操作人员检查数据文件，要求文件应完整，内容应正常，否则应重新检测；
- e) 选择钻芯点或无核密度仪检测点进行压实度标定，取芯验证时测试点数不小于 3 个，无核密度仪验证时测试点数不小于 9 个。

沥青路面厚度均匀性检测前不需进行金属板标定，采集完成后钻芯进行介电常数标定。当同时进行压实均匀性检测时，可与压实度标定共用芯样。

5.3.4 数据采集

所采集数据符合下列规定：

- a) 测试数据所包含的信息应能覆盖整个检测区域，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，数据采集时出现信号中断情况，应重新采集或补测；
- b) 采集数据的信噪比应满足数据处理、解释需要，不宜低于 120 dB；
- c) 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。

5.4 数据处理

5.4.1 压实均匀性检测数据不应进行增益处理，厚度均匀性检测数据应进行增益处理。

5.4.2 压实均匀性检测时，利用专用处理软件分别读取各通道、各位置路面表面反射振幅 (A_0)，以及金属板标定过程中雷达数据的金属板表面反射振幅 (A_p)，并以文本或表格形式输出。

按照公式（7）计算检测范围内路表介电常数分布，并以文本或表格形式输出，亦可表达为介电常数分布云图。

$$\varepsilon_{r,1} = \left(\frac{1 + \frac{A_0}{A_p}}{1 - \frac{A_0}{A_p}} \right)^2 \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$\varepsilon_{r,1}$ ——检测范围内路表介电常数；

A_0 ——雷达数据的路面表面反射振幅，单位为米（m）；

A_p ——金属板标定过程中雷达数据的金属板表面反射振幅，单位为米（m）。

5.4.3 压实均匀性检测时，读取压实度标定中所选定点位对应的介电常数值，建立路面压实度与介电常数的关系公式，计算检测范围内的路表压实度。厚度均匀性检测时，沥青路面厚度计算应符合 JTG 3450—2019 中 T 0913 的相关规定。

5.4.4 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，表格形式及内容见附录 B。

5.4.5 计算测试结果平均值及标准差，并按照 3 倍标准差方法进行异常值处理，舍弃平均值左右 3 倍标准差范围以外的实测值，然后再重新计算整理。

5.4.6 压实均匀性检测时，绘制压实度云图，计算极差、变异系数，按公式（8）及公式（9）分别计算超压区域及欠压区域面积系数，按公式（10）及公式（11）分别计算超压区域及欠压区域分布系数。

$$AI_{HD} = 100 \times \frac{\sum A_H}{A} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

AI_{HD} ——检测区域超压区域面积系数；

A_H ——检测区域超压区域面积，单位为平方米（m²）。

注：超压指压实度大于采用最大理论密度的97%（SMA路面：98%）。

$$AI_{LD} = 100 \times \frac{\sum A_L}{A} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

AI_{LD} ——检测区域欠压区域面积系数；

A_L ——检测区域欠压区域面积，单位为平方米（m²）。

注：欠压对高速公路、一级公路指压实度小于采用实验室标准密度的97%（SMA路面：98%），采用最大理论密度的93%（SMA路面：94%），采用试验段密度的99%（SMA路面：99%）。

$$DI_{HD} = 100 \times \frac{\omega_H A_H}{A} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

DI_{HD} ——检测区域超压区域分布系数；

ω_H ——检测区域超压区域面积权重，按区域块数取值见表4。

$$DI_{LD} = 100 \times \frac{\omega_L A_L}{A} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

DI_{LD} ——检测区域欠压区域分布系数；

ω_L ——检测区域欠压区域面积权重，按区域块数取值见表4。

表4 分散度权重赋值表

区域块数	1 块	2 块~3 块	4 块~5 块	≥ 6 块
权重赋值	1	0.7	0.5	0.3

5.4.7 厚度均匀性检测时，绘制厚度分布云图，计算极差、变异系数，按公式（12）计算偏薄区域面积系数，按公式（13）计算偏薄区域分布系数。

$$AI_{TT} = 100 \times \frac{\sum A_T}{A} \dots\dots\dots (12)$$

式中：
 AI_{TT} ——检测区域偏薄区域面积系数；
 A_T ——检测区域偏薄区域面积，单位为平方米（ m^2 ）。
注：偏薄指检测厚度小于设计厚度的95%。

$$DI_{TT} = 100 \times \frac{\omega_T A_T}{A} \dots\dots\dots (13)$$

式中：
 DI_{TT} ——检测区域偏薄区域分布系数；
 ω_T ——检测区域偏薄区域面积权重，按区域块数取值见表4。

6 报告

报告应包括但不局限于以下内容：

- a) 检测目的及项目概况；
- b) 设备名称及标定结果；
- c) 检测范围及检测过程；
- d) 检测结果：
 - 1) 数据类结果：测区检测原始数据及检测数据处理结果，包括极差，温差系数，变异系数，区域面积系数，区域分布系数等；
 - 2) 图件类结果：包括测区划分图，测量方式图，测区检测参数云图，检测参数区域分布图，成果解释图等。
- e) 检测结论。

附 录 A
(资料性)
三维探地雷达现场记录表

三维探地雷达现场记录表见表A. 1。

表A. 1 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		
检测示意图					路面结构		
操作人：		记录人：		日 期：		第 页/共 页	

附 录 B
(资料性)
雷达介电常数标定记录表

雷达介电常数标定记录表见表B. 1。

表B. 1 雷达介电常数标定记录表

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		

参 考 文 献

- [1] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范
 - [2] DB37/T 5122—2018 探地雷达测定道路结构层厚度技术规程
-