

DB53

云 南 省 地 方 标 准

DB53/T 1034—2021

公路隧道隐蔽工程无损检测技术规程

2021 - 05 - 25 发布

2021 - 08 - 25 实施

云南省市场监督管理局 发 布

目 次

前言 III

引言 IV

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

 4.1 一般规定 2

 4.2 检测项目与内容 2

 4.3 检测设备 2

5 断面尺寸检测 3

 5.1 检测内容及方法 3

 5.2 检测设备 3

 5.3 检测要求 3

 5.4 数据处理 3

6 锚杆检测 4

 6.1 检测内容与方法 4

 6.2 检测设备 4

 6.3 检测要求 4

 6.4 数据处理 4

7 衬砌检测 5

 7.1 检测内容及方法 5

 7.2 回弹法 5

 7.3 地质雷达法 5

8 仰拱检测 6

 8.1 检测内容及方法 6

 8.2 检测要求 6

 8.3 数据处理 7

9 质量评定 8

 9.1 断面尺寸检测质量评定 8

 9.2 锚杆检测质量评定 8

 9.3 衬砌检测质量评定 8

 9.4 仰拱检测质量评定 9

10 检测报告 9

附录 A（资料性附录）	隧道锚杆检测记录表	10
附录 B（资料性附录）	相对介电常数标定方法.....	11
附录 C（资料性附录）	隧道衬砌检测测线布置方式.....	12
附录 D（资料性附录）	地质雷达法隧道衬砌检测记录表.....	13
附录 E（资料性附录）	隧道仰拱检测记录表	14
附录 F（资料性附录）	隧道仰拱钢架数量检测数据处理.....	15
参考文献		16

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。

本文件由云南省交通运输厅工程质量监督局提出。

本文件由云南省交通运输标准化技术委员会(YNTC13)归口。

本文件主要起草单位：云南省交通运输厅工程质量监督局、云南航天工程物探检测股份有限公司、中国公路工程咨询集团有限公司、昭通市都香高速公路投资开发有限公司、云南省公路科学技术研究院、中铁开发投资集团有限公司、云南玉楚高速公路投资开发有限公司、昭通市交通运输局、长安大学、中铁西南科学研究院有限公司。

主要起草人员：陈跃、吴华金、王萍、李俊锋、张卓、苏建坤、任志华、刘浩、张维平、刘巍、李万宝、杨曦、王晖、李文龙、蓝斌、杨文华、李兴泽、张发、袁瑞、陶明友、吴勇木、冯红耀、王宪伟、郑春鹏、高宗登、谢光莹、钟安然、杜杰贵、杨绪祥、彭余华、叶飞、保雨含、徐天辉、邓平、汤斌、周斌、宁锐、宋上明、王若俊。

引 言

根据交通运输部办公厅《关于印发〈品质工程攻关行动试点方案（2018-2020年）〉的通知》（交办安监[2018]18号），以及重庆市交通委员会代交通运输部制定的《隧道施工质量安全管控能力提升攻关行动实施方案》（渝交委路[2018]94号）的分工安排，由云南省交通运输厅工程质量监督局联合相关单位重点攻关隧道隐蔽工程无损检测技术与方法。

编写组在总结行业现有技术和科研成果的基础上，通过联合攻关编制了《公路隧道隐蔽工程无损检测技术规程》，本标准旨在提升隧道施工质量安全管控能力，规范隧道隐蔽工程无损检测方法。

-

公路隧道隐蔽工程无损检测技术规程

1 范围

本文件确立了公路隧道隐蔽工程无损检测的基本要求、断面尺寸检测、锚杆检测、衬砌检测、仰拱检测、质量评定、检测报告。

本文件适用于新建和改扩建公路隧道隐蔽工程无损检测工作。

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。

JGJ/T 23 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程
JGJ/T 182 锚杆锚固质量无损检测技术规程
JGJ/T 411 冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程
JT/T 828 公路水运试验检测数据报告编制导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

相对介电常数 relative permittivity
介质相对于真空的介电常数。

3.2

采样间隔 sampling interval
相邻采样点间的时间间隔。

3.3

测量时窗 measurement time window
信号采集的时间范围。

3.4

有效异常 effective anomaly
检测目标体产生的异常。

3.5

干扰异常 interface anomaly
检测目标体以外的其他因素引起的异常。

3.6

冲击回波法 impact-echo method

通过冲击方式产生瞬态冲击弹性波并接收冲击弹性波信号，分析冲击弹性波及其回波的波速、波形和主频频率等参数的变化，判断混凝土结构的厚度和内部缺陷的方法。

4 基本要求

4.1 一般规定

- 4.1.1 隧道隐蔽工程无损检测应纳入施工工序管理。
- 4.1.2 应在收集并分析与检测相关资料的基础上，制定检测方案。
- 4.1.3 原始数据处理前应回放，复核检测数据是否有效，确保记录完整、信号清晰。
- 4.1.4 检测单位应对检测结果进行分析和评判，并向委托单位出具检测报告。
- 4.1.5 对检测结果有异议时，可选用其他检测方法进行验证，确认质量不合格的工程，应在处置后进行复检。

4.2 检测项目与内容

公路隧道隐蔽工程无损检测的项目与内容如表 1 所示。

表1 检测项目与内容

项目	内容
断面尺寸	开挖、初期支护和二次衬砌的断面尺寸。
锚杆	锚杆的长度、注浆饱满度。
衬砌	喷射混凝土强度、厚度、与围岩的接触状况； 钢架数量； 二次衬砌混凝土强度、厚度，二次衬砌背后空洞及密实情况。
仰拱	仰拱及仰拱填充厚度，填充密实情况。

4.3 检测设备

- 4.3.1 主要技术性能应满足检测需要。
- 4.3.2 检测前应进行检查、调试，并确认正常后使用。
- 4.3.3 应按规定定期检定/校准、自检/比对、保养维护。
- 4.3.4 应满足防尘、防潮、防震等技术要求。

5 断面尺寸检测

5.1 检测内容及方法

隧道断面尺寸检测内容应包括开挖、初期支护和二次衬砌的断面尺寸检测，宜采用激光断面仪，也可采用三维激光扫描仪、全站仪进行检测。

5.2 检测设备

- 5.2.1 采用激光断面仪进行隧道断面尺寸检测时，应满足下列规定：

- a) 检测半径：1 m ～ 20 m；

- b) 检测点数：不少于 35 个点/断面；
- c) 测距精度：优于 $\pm 1 \text{ mm}$ ；
- d) 测角精度：优于 0.01° ；
- e) 定位测量方式：具有垂直向下激光定心标志、测距功能。

5.2.2 采用三维激光扫描仪进行隧道断面尺寸检测时，应满足下列规定：

- a) 距离精度：优于 $\pm 1 \text{ cm}$ ；
- b) 测距：不小于 50 m；
- c) 视野范围：垂直不小于 270° ，水平为 360° ；
- d) 宜具有照片叠加功能。

5.2.3 采用全站仪进行隧道断面尺寸检测时，应满足下列规定：

- a) 精度：优于 $3''$ ；
- b) 测距精度：优于 1 cm；
- c) 视准轴仰角： $30^\circ \sim 60^\circ$ 。

5.3 检测要求

5.3.1 断面尺寸检测频率：开挖断面尺寸检测宜每 20 m 一个断面，初期支护断面尺寸检测宜每 10 m 一个断面，二次衬砌断面尺寸检测宜每 50 m 一个断面，断面间距可根据实际情况调整。

5.3.2 检测前，在隧道内设置测量基点（优选隧道中线点），并记录该点地面高程 H_1 ，同时在隧道边墙上放出对应的横断面点。

5.3.3 采用激光断面仪检测时，检测步骤如下：

- a) 仪器安装，对中归零，并测量仪器高度 Z_1 ；
- b) 设置断面起止测量角度、检测点数等信息；
- c) 现场测量、对比；
- d) 数据存储。

5.4 数据处理

5.4.1 隧道断面尺寸检测数据处理按以下步骤进行：

- a) 在软件中输入隧道设计轮廓曲线，并将检测数据导入软件中；
- b) 获取隧道断面测量基点设计高程 H_2 ；
- c) 计算相对于路面设计高程的仪器高度 Z ，应按式（1）计算。

$$Z = Z_1 - (H_2 - H_1) \dots\dots\dots(1)$$

式中：

Z_1 ——现场所测量到的仪器高度（m）；

H_1 ——隧道现场检测时的地面高程（m）；

H_2 ——隧道该点设计高程（m）。

5.4.2 对比隧道设计断面轮廓曲线和检测断面曲线，判断检测断面侵入限界情况。

6 锚杆检测

6.1 检测内容与方法

隧道锚杆检测内容应包括锚杆的长度、注浆饱满度，应采用声波反射法检测。

6.2 检测设备

采用锚杆锚固检测仪进行隧道锚杆检测时，应满足下列规定：

- a) 震源可采用可控震源或锤击震源；
- b) 可控震源频率范围为 10 Hz ~ 50 kHz，宜使用超磁致伸缩振源；
- c) 采集系统增益不小于 20 dB，频率范围与传感器匹配，模数转换精度不小于 16 bit，采样间隔不大于 10 μ s，可调节；
- d) 接收传感器采用小型加速度传感器，频率响应范围为 10 Hz ~ 100 kHz，感应面直径小于锚杆直径；
- e) 时域信号记录长度、采样率应根据杆长、波速、频率及分辨率等设置。

6.3 检测要求

6.3.1 锚杆质量检测宜按不大于隧道长度 50 m 作为单元测区，每个单元测区的锚杆抽检根数不少于 20 根。

6.3.2 被检锚杆应采用随机方式选择，并重点选取围岩条件较差部位、施工较困难部位和工程重点部位的锚杆。

6.3.3 单元测区抽检锚杆不合格率大于 10%时，应对未检测的锚杆进行加倍抽检；加倍检测仍不合格的，该单元测区评定为不合格。

6.3.4 现场检测时，应符合下列规定：

- a) 检测前清除外露端周边浮浆，外露长度满足检测需求；
- b) 记录被测锚杆外露段长度，描述孔口段锚固情况；
- c) 接收传感器安装在锚杆端面，端面平整，并采用适当的方式与杆体耦合；
- d) 单根锚杆检测记录不少于 3 个有效波形，且一致性较好；
- e) 钢筋锚杆的激振点应选择在锚杆端面；中空锚杆的激振点宜紧贴在靠近接收传感器一侧的环状管壁端面上，保持激振器的轴线与杆轴线平行；
- f) 检测期间，现场周边不得有机械振动等对检测数据有明显干扰的施工作业。

6.3.5 锚杆检测记录、现场标识应与实际桩号和部位一致，检测记录表参见附录 A。

6.4 数据处理

6.4.1 锚杆长度、注浆饱满度计算方法应按 JGJ/T 182 的规定执行。

6.4.2 出现下列情况之一时，宜采用其他方法进行验证：

- a) 外露自由段过长、弯曲或杆体截面多变；
- b) 实测信号复杂、衰减缓慢，无法对其进行准确分析与评价。

7 衬砌检测

7.1 检测内容及方法

隧道衬砌质量检测内容应包括喷射混凝土强度、厚度、与围岩的接触状况检测，钢架数量，二次衬砌混凝土强度、厚度、背后空洞及密实情况检测。喷射混凝土和二次衬砌混凝土强度检测宜采用回弹法，其余项目检测宜采用地质雷达法或冲击回波法，冲击回波法检测应按 JGJ/T 411 的规定执行。

7.2 回弹法

7.2.1 混凝土强度检测测区应均匀分布，喷射混凝土检测宜每 10 延米不少于 10 个测区，二次衬砌混凝土检测宜每模不少于 10 个测区。

7.2.2 回弹法混凝土强度检测方法应按 JGJ/T 23 的规定执行。

7.3 地质雷达法

7.3.1 地质雷达由主机、天线构成：

- a) 地质雷达主机性能和技术指标应符合下列规定：
 - 1) 具有信号叠加、滤波、点测与连测、手动与自动位置标记等功能；
 - 2) 模数转换精度不小于 16 bit；
 - 3) 最小采样间隔不大于 0.2 ns；
 - 4) 具有自动和手动增益调节功能，增益点数不少于 3 个；
 - 5) 信号最大叠加次数不少于 32 次；
 - 6) 优先选用具有实时采样功能、无线功能的雷达。
- b) 地质雷达采用屏蔽天线，天线性能和技术指标应符合下列规定：
 - 1) 中心频率为 400 MHz~900 MHz；
 - 2) 中心频率允许偏差为 $\pm 5\%$ ；
 - 3) 天线频带范围不小于中心频率的 0.25 倍~2 倍。

7.3.2 相对介电常数应根据现场混凝土实测厚度进行标定，标定方法参见附录 B。

7.3.3 检测时应每 5 m~10 m 进行一个里程标记。

7.3.4 隧道衬砌质量检测应采用连续采集方式，扫描速度应不小于 40 道/s。

7.3.5 隧道衬砌检测测线布置方式参见附录 C，并应符合下列规定：

- a) 两车道隧道在拱部、边墙布设不少于 3 条测线，三车道及三车道以上隧道在拱部、边墙布设不少于 5 条测线；
- b) 测线布设应以纵向为主，环向为辅，当不具备纵向检测条件或需要界定缺陷范围时，应布设环向测线；
- c) 条件允许时，宜采用隧道检测车进行衬砌质量检测。

7.3.6 混凝土厚度检测应符合以下规定：

- a) 喷射混凝土厚度检测宜沿纵向测线每 3 m 取一个点进行统计；
- b) 二次衬砌混凝土厚度检测宜沿纵向测线每 2 m 取一个点进行统计。

7.3.7 现场检测时，应符合下列规定：

- a) 天线与衬砌表面密贴（空气耦合天线除外）；
- b) 测量时窗根据衬砌厚度与相对介电常数选取，可设置为 25 ns~50 ns；
- c) 天线平稳移动、速度均匀，移动速度宜为 3 km/h~5 km/h；
- d) 分段检测时，相邻段搭接长度不小于 1 m；
- e) 记录可能对雷达信号产生影响的物体（如渗水、电缆、铁架等）及其位置。

7.3.8 记录表应包括工程名称、隧道名称、检测日期、检测里程、测线方向、现场描述等主要信息，参见附录 D。

7.3.9 地质雷达法隧道衬砌检测数据宜按图 1 所示流程处理。

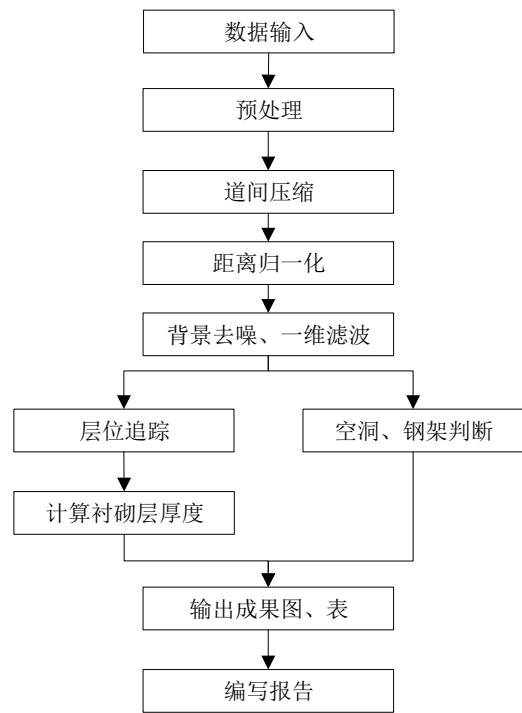


图1 数据处理流程图

- 7.3.10 地质雷达法隧道衬砌检测数据解释应符合下列规定：
- a) 在掌握测区内物性参数和衬砌结构的基础上，按由已知到未知、由定性到定量的原则进行；
 - b) 根据现场记录，准确区分有效异常和干扰异常；
 - c) 准确读取时-深数据，追踪层位。
- 7.3.11 喷射混凝土与围岩、二次衬砌与喷射混凝土接触状况可按下列特征判释：
- a) 密实：信号幅度均匀且较弱，同相轴连续；
 - b) 不密实：初期支护界面的强反射信号同相轴呈绕射弧形，且不连续，较分散；
 - c) 空洞：初期支护界面反射信号强，三振相明显，在其下部仍有强反射界面信号，两组信号时程差较大。
- 7.3.12 衬砌内部钢架分布的主要判释特征为分散的抛物线形强反射信号。

8 仰拱检测

8.1 检测内容及方法

隧道仰拱检测内容应包括仰拱及仰拱填充厚度、填充密实情况，有条件时，也可对钢架数量进行检测。隧道仰拱检测宜采用地质雷达法。

8.2 检测要求

- 8.2.1 仰拱检测宜在仰拱填充混凝土达到设计强度后进行。
- 8.2.2 天线频率宜选用 200 MHz ～ 400 MHz。
- 8.2.3 仰拱检测有效深度应超过设计开挖线 1.0 m。
- 8.2.4 宜采用测量轮方式采集，扫描道间距应小于 2 cm。
- 8.2.5 仰拱检测宜按隧道长度 50 m 作为单元测区，每 10 m 为一个评价单元。

8.2.6 单元测区内测线按网格布设。以隧道中线为基线，左右两侧对称布置纵向测线，测线间距宜按 2 m~5 m 布设；横向测线与基线垂直，宜按 5 m 等间距布设。

8.2.7 应标注每条纵向测线的起止点里程桩号及高程。

8.2.8 现场工作时应满足下列规定：

- a) 仰拱表面平整、干净、无积水、无障碍物；
- b) 天线与地面密贴，沿直线匀速移动；
- c) 适时记录可能对雷达信号产生干扰的因素（如渗水、电缆、铁架等）及位置。

8.2.9 仰拱检测记录表参见附录 E。

8.3 数据处理

8.3.1 仰拱检测数据宜按图 2 所示流程处理。

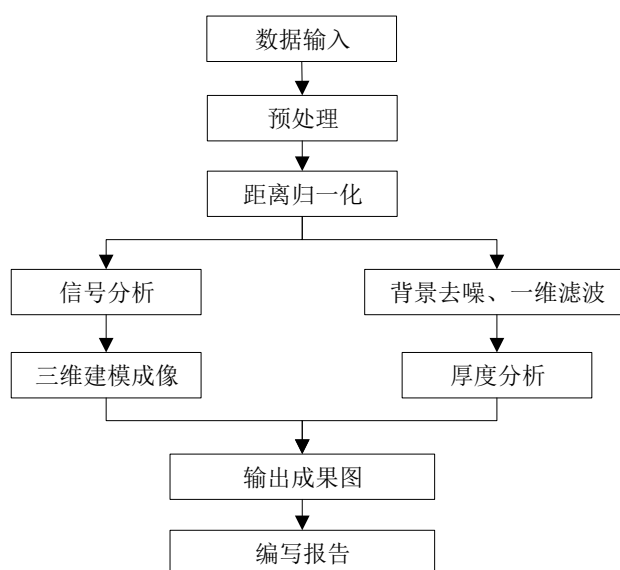


图2 数据处理流程图

8.3.2 仰拱填充混凝土密实度按式（2）计算。

$$D = \frac{L - L_1}{L} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中：

D —— 填充混凝土密实度；

L —— 测线长度（m）；

L_1 —— 不密实区测线长度（m）。

8.3.3 开挖深度合格率按式（3）计算。

$$\eta = \frac{n}{N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中：

η —— 开挖深度合格率；

n —— 合格点数；

N —— 参与统计总点数（不少于100点）。

8.3.4 钢架数量检测数据处理参见附录 F。

9 质量评定

9.1 断面尺寸检测质量评定

9.1.1 隧道开挖断面尺寸检测质量评定应满足表 2 要求。

表2 开挖断面尺寸检测质量评定

序号	检测项		规定值或允许偏差
1	拱部超挖 (mm)	I 级围岩 (硬岩)	平均+100, 最大+200
		II、III、IV 级围岩 (中硬岩、软岩)	平均+150, 最大+250
		V、VI 级围岩 (破碎岩、土)	平均+100, 最大+150
2	边墙超挖 (mm)	每侧	+100, 0
		全宽	+200, 0
3	仰拱、隧底超挖 (mm)		平均+100, 最大+250

9.1.2 隧道初期支护及二次衬砌断面尺寸不应小于设计值。

9.2 锚杆检测质量评定

9.2.1 实测锚杆长度应不少于设计长度的 95%。

9.2.2 被检锚杆注浆饱满度应不小于 75%。

9.2.3 锚杆长度和锚固饱满度均合格后, 该锚杆质量评定为合格。

9.2.4 每个单元测区的锚杆质量抽检合格率不应小于 80%; 单元测区内实测锚杆长度小于设计长度 1.0m 的锚杆数量大于等于 3 根时, 该测区判定为不合格。

9.3 衬砌检测质量评定

隧道衬砌检测质量评定应满足表 3 要求。

表3 隧道衬砌检测质量评定

序号	检测项	规定值或允许偏差
1	混凝土强度	不小于设计值
2	喷射混凝土厚度	60%的检测点厚度 $\geq$ 设计厚度, 且最小厚度 $\geq$ 0.6 倍设计厚度
3	喷射混凝土与围岩接触状况	无空洞、无杂物
4	钢架数量	不少于设计值
5	二次衬砌厚度	90%检测点的厚度 $\geq$ 设计厚度, 且最小厚度 $\geq$ 0.5 设计厚度
6	衬砌背部空洞及密实情况	无空洞, 无杂物

9.4 仰拱检测质量评定

9.4.1 隧道仰拱检测质量评定应满足表 4 要求。

表4 隧道仰拱检测质量评定

序号	检测项	规定值或允许偏差
1	开挖深度	不小于设计值
2	仰拱及仰拱填充混凝土密实度	无空洞，无杂物

9.4.2 评价单元内仰拱开挖深度合格率不应低于 95%。

9.4.3 评价单元内仰拱及仰拱填充混凝土密实度合格率不应低于 95%，且连续不密实长度不应大于 3 m。

10 检测报告

10.1.1 检测报告应用词规范、文字简练、结论明确。

10.1.2 检测报告应执行 JT/T 828 的规定，包括下列内容：

- a) 概况；
- b) 检测依据；
- c) 检测方法及仪器设备；
- d) 测区、测线布置；
- e) 检测结果；
- f) 结论与建议；
- g) 附件。

附 录 A
(资料性附录)
隧道锚杆检测记录表

隧道锚杆检测记录表格式参见表A. 1。

表A. 1 隧道锚杆检测记录表

检测单位名称:

记录编号:

工程名称			合同段				
隧道名称			测区里程				
主要仪器设备及编号							
序号	锚杆编号	里程桩号	位置	锚杆类型及规格	设计长度(m)	外露长度(m)	备注
备注:							

检测：校核：日期： 年 月 日

附 录 B
(资料性附录)
相对介电常数标定方法

相对介电常数标定应符合下列规定：

- a) 检测前应对衬砌混凝土的介电常数做现场标定，每座隧道应不少于 1 处，每处实测不少于 3 次，取平均值为该隧道的介电常数。对特长隧道，应增加标定点数。
- b) 标定方法包括：在已知厚度部位（如洞口或紧急停车带处等）或材料与隧道相同的其他预制件上测量；钻孔实测。
- c) 求取参数时应具备的条件：标定目标体的厚度不宜小于 15 cm，且厚度已知；标定记录中反射信号的界面应清晰、准确。
- d) 标定结果应按式 (B.1 ~ B.2) 计算：

$$\varepsilon_r = \left(\frac{0.3t}{2d} \right)^2 \dots\dots\dots (B.1)$$

$$v = \frac{2d}{t} \times 10^9 \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

ε_r —— 相对介电常数；

v —— 电磁波速 (m/s) ；

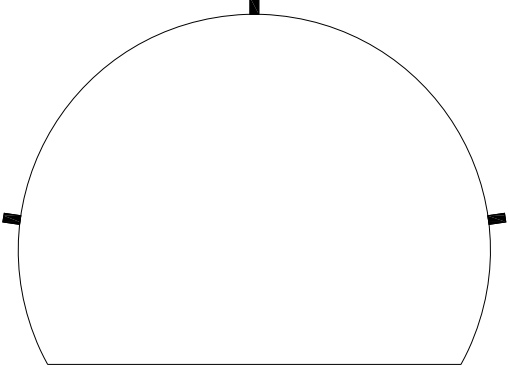
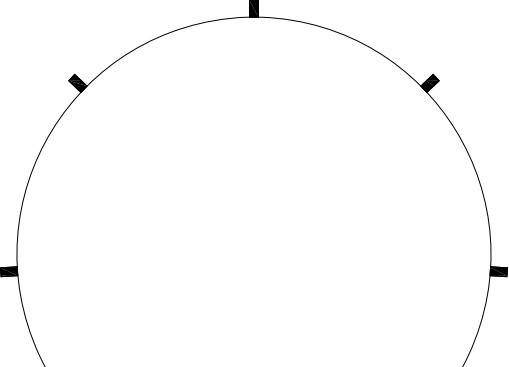
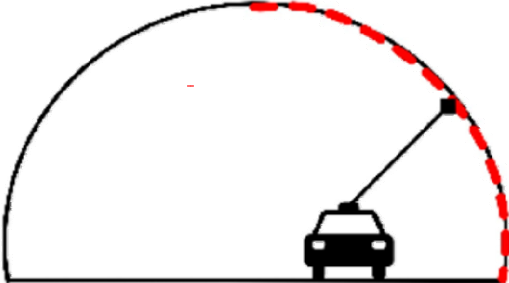
t —— 双程旅行时间 (ns) ；

d —— 标定目标体厚度或距离 (m) 。

附 录 C
(资料性附录)
隧道衬砌检测测线布置方式

隧道衬砌检测测线布置方式参见表C. 1。

表 C.1 隧道衬砌检测测线布置方式

两车道 隧道	
	在隧道拱部、边墙布置3条测线，记录每条测线相对路面的高度。
三车道 及三车 道以上 隧道	
	在隧道拱部、边墙布置5条测线，记录每条测线相对路面的高度。
隧道检 测车	
	隧道检测车可在不阻断交通情况下进行检测，效率高，作业安全，利用机械臂可准确定位至横、纵向测线，可实现三维检测。

附 录 D
(资料性附录)
地质雷达法隧道衬砌检测记录表

地质雷达法隧道衬砌检测记录表格式参见表D. 1。

表 D. 1 地质雷达法隧道衬砌检测记录表

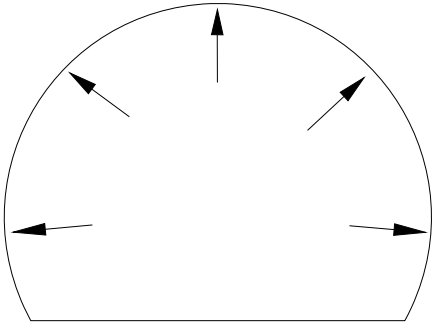
检测单位名称：

记录编号：

工程名称				合同段	
隧道名称				检测里程	
主要仪器设备 及编号					
检测类型	初支检测 ☐ 初支复测 ☐ 二次衬砌检测 ☐ 二次衬砌复测 ☐				
文件名	测线位置	起点	终点	备注	

注：

测线位置示意图



说明：

1: 表中备注栏记录现场干扰影响情况。

2. 雷达仪器设置参数:

时窗:

采样点数:

扫描速率:

滤波参数:

低通 (L) = MHz

高通 (H) = MHz

检测：

记录：

日期： 年 月 日

附 录 E
(资料性附录)
隧道仰拱检测记录表

隧道仰拱检测记录表格式参见表E. 1。

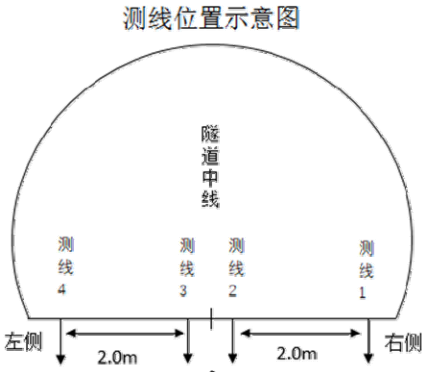
表 E. 1 隧道仰拱检测记录表

检测单位名称:

记录编号:

项目名称		合同段			
隧道名称		检测里程			
主要仪器设备 及编号					
测线记录					
序号	文件名	测线位置	起点	终点	备注

注:



- 说明:
- 1. 表中备注栏记录该测线现场干扰影响因素。
 - 2. 雷达仪器设置参数:
时窗:
采样点数:

检测: 记录: 日期: 年 月 日

附 录 F
(资料性附录)
隧道仰拱钢架数量检测数据处理

F.1.1 检测前应对地质雷达天线进行介质响应频率标定，测定天线对金属的响应频率。

F.1.2 数据处理可采用谱能比方法，步骤如下：

- a) 读取单道雷达数据（读取钢架设计深度 ± 30 cm 范围内单道雷达数据）；
- b) 确定短时傅里叶变换时间窗口宽度（ Δt ）；
- c) 计算当前道雷达数据不同时深位置的金属介质谱能比值：
 - 1) 对信号进行短时傅里叶变换，得到第一个窗口内信号的频谱图；
 - 2) 计算金属介质谱能比值，按式 F.1 执行：

$$\lambda = \frac{A_1}{A} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中：

A_1 —— 目标介质响应频率范围内的能量, $A_1 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} f(\omega) d\omega$ ；

A —— 全频谱能量, $A = \int_0^{\infty} f(\omega) d\omega$ 。

3) 移动时间窗口，得出不同时深位置的金属介质谱能比值。

- d) 重复以上步骤，对测区内每道雷达数据均进行金属介质谱能比值计算；
- e) 将谱能比值数据进行三维建模，得到谱能比值三维数据块；
- f) 将三维数据块导入可视化软件，通过显示设置、调节，显示钢架位置，统计钢架数量。

参 考 文 献

- [1] JTG 3370.1-2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程
 - [2] JTG/T 3660-2020 公路隧道施工技术规范
 - [3] JGJ/T 182-2009 锚杆锚固质量无损检测技术规程
 - [4] JTG F80/1-2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
 - [5] TB 10223-2004 铁路隧道衬砌质量无损检测规程
 - [6] JT/T 1181-2018 公路水运工程试验检测等级管理要求
 - [7] JT/T 828-2019 公路水运试验检测数据报告编制导则
 - [8] 《公路水运试验检测数据报告编制导则》（JT/T 828-2019）释义手册
 - [9] 公路水运工程试验检测机构等级标准交安监发（2017）113号
-