

# T/STSI

## 团体标准

T/STSI 51—2025

### 边坡与结构体雷达监测技术要求

Technical requirements for radar monitoring of slopes and structures

2025 - 05 - 30 发布

2025 - 05 - 31 实施

## 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 监测原理与方法 .....	1
5 监测设备要求 .....	4
6 数据采集与处理 .....	5
7 监测结果评估与预警 .....	6
8 质量控制与安全管理 .....	7

## 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。

本文件由深圳市开阳星信息科技有限公司提出。

本文件由中关村新兴科技服务业产业联盟归口。

本文件起草单位：深圳市开阳星信息科技有限公司、江苏普光微电子有限公司、中国地质大学（武汉）机械与电子信息学院、深圳大学、深圳职业技术大学电子与通信工程学院、深圳市微波通信技术应用行业协会、东莞市交通投资集团有限公司。

本文件主要起草人：江荣、陈义钦、周峰、张钦、曾三友、符灿威、周涛、宋荣、何业军、张秀君、张涵、续飞。

# 边坡与结构体雷达监测技术要求

## 1 范围

本文件规定了边坡与结构体雷达监测技术的术语和定义、监测原理与方法、设备要求、数据采集与处理、监测结果评估与预警、质量控制与安全管理。

本文件适用于以下场景：

- a) 自然或人工边坡（土质边坡、岩质边坡、矿山边坡等）的稳定性监测；
- b) 结构体（桥梁、隧道、大坝、高层建筑、大型储罐等）的变形、位移、裂缝及倾斜监测；
- c) 地质灾害易发区域（滑坡、崩塌、泥石流等）的实时预警与监测；
- d) 工程施工过程中对边坡及结构体的安全监测与风险管控。

## 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。

- GB 50330-2013 建筑边坡工程技术规范
- GB 50343-2012 建筑物电子信息系统防雷技术规范
- GB/T 18894-2016 电子文件归档与电子档案管理规范
- GB/T 29639-2020 生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则
- GB/T 37228-2018 公共安全 应急管理 突发事件响应要求
- GB/T 50026-2020 工程测量规范
- GB/T 50269-2015 地基动力特性测试规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 边坡雷达监测 Slope radar monitoring

利用微波反射与干涉测量原理，通过雷达设备对边坡表面及深层的位移、形变等参数进行非接触式连续监测的技术，当边坡发生位移或形变时，反射点的位置会发生改变，导致反射信号的传播路径长度发生变化，进而引起发射信号与反射信号之间的相位差改变，通过对不同位置、不同时间点的位移、形变数据进行分析，即可实现对边坡整体稳定性的监测与评估

### 3.2

#### 结构体形变速率阈值 Structural deformation rate threshold

根据工程安全等级设定的形变速率临界值，用于触发分级预警机制。

### 3.3

#### 地基雷达 ground based radar

固定安装于地面的合成孔径雷达，适用于高精度、近距离监测。

### 3.4

#### 机载雷达 airborne radar

搭载于飞行平台的雷达系统，适用于大范围、远距离监测。

## 4 监测原理与方法

### 4.1 基本原理

#### 4.1.1 微波反射原理

4.1.1.1 雷达系统应发射特定频率的电磁波（通常为 X 波段或 Ku 波段），电磁波在遇到边坡或结构体表面后应发生反射，接收器应捕获反射信号并应记录其振幅与相位信息。

4.1.1.2 应根据发射波与反射波的相位差，结合雷达波长（ $\lambda$ ），计算目标物的位移量，其精度应可达亚毫米级（ $\leq 0.5\text{mm}$ ）。

4.1.1.3 当监测距离 $\leq 100$ 米时，位移量计算精度应稳定保持在亚毫米级（ $\leq 0.5\text{mm}$ ），监测距离处于 100–500 米范围，受电磁波衰减、多路径效应影响，精度降至 1–2mm，监测距离 $> 500$ 米，精度进一步下降至 2–5mm。

#### 4.1.2 干涉测量技术（InSAR）

应采用合成孔径雷达（SAR）技术，通过多次观测同一区域生成干涉图，结合差分处理（D-InSAR）消除大气延迟和地形误差，提取微小形变信息。

#### 4.1.3 多源数据融合

##### 4.1.3.1 数据采集与同步

4.1.3.1.1 应利用各传感器按设定频率实时采集数据，同时通过统一的时间戳对雷达、GNSS、倾斜仪、裂缝计等数据进行时间同步，确保不同类型数据在时间维度上对齐，避免因时间偏差导致融合结果失真。

4.1.3.1.2 应采用高精度的时间同步模块，如基于全球定位系统（GPS）或北斗卫星导航系统（BDS）的授时设备，为所有传感器提供统一的时间基准。

4.1.3.1.3 各传感器应通过硬件接口与时间同步模块连接，接收精确的时间信号，实现硬件层面的时间同步。

4.1.3.1.4 针对采集频率差异较大的传感器，应建立数据缓冲区。高频采集数据应暂存于缓冲区中，根据低频传感器的采集频率，对高频数据进行重采样处理，降低数据频率，使不同频率数据在时间间隔上匹配，实现数据融合所需的时间同步。

##### 4.1.3.2 数据预处理

4.1.3.2.1 应对采集的数据分别进行滤波去噪（采用如小波变换、中值滤波等方法）、异常值剔除和归一化处理，提升数据质量。

4.1.3.2.2 对于雷达数据，应重点去除电磁干扰产生的噪声；GNSS 数据应修正多路径效应引起的误差；倾斜仪和裂缝计数据则应剔除因设备振动产生的异常值。

##### 4.1.3.3 特征提取

特征提取应包含以下内容：

- a) 雷达数据：提取位移变化速率、形变梯度等特征；
- b) GNSS 数据：获取三维坐标变化、定位精度指标等；
- c) 倾斜仪数据：提取倾斜角度、角度变化率；
- d) 裂缝计数据：提取裂缝宽度、裂缝扩展速度。

##### 4.1.3.4 融合算法选择与实施

4.1.3.4.1 加权平均法：应根据各传感器数据的历史精度和稳定性赋予不同权重，适用于数据相对稳定、误差特性明确的场景。例如，若雷达在某监测区域长期精度较高，可赋予较高权重，计算加权平均值作为融合结果。

4.1.3.4.2 卡尔曼滤波法：应建立状态空间模型，适用于处理动态变化的监测数据，可实时预测和更新边坡状态，有效融合不同频率采集的数据。如将 GNSS 低频定位数据与雷达高频位移数据通过卡尔曼滤波融合，优化数据连续性。

4.1.3.4.3 D-S 证据理论：应通过构建基本概率分配函数，处理不确定信息。当传感器数据存在冲突

或不确定性时，可利用该方法综合各传感器证据，得出更可靠的融合结论，如判断边坡是否存在局部失稳。

## 4.2 雷达类型及适用场景

雷达类型及适用场景应见下表所示：

表 1 雷达类型及适用场景明细表

雷达类型	技术特点	适用场景	特殊地形部署要求与使用限制
地基SAR雷达	固定安装，分辨率 $\leq 1\text{mm}$ ，监测距离 $\leq 5\text{km}$	矿山边坡、大坝、桥梁、隧道等近距离高精度监测	\
机载SAR雷达	覆盖范围 $\geq 10\text{km}$ ，分辨率 $\leq 5\text{mm}$	大面积滑坡区域、交通干线、水利枢纽监测	\
便携式雷达	快速部署，重量 $\leq 20\text{kg}$ ，支持实时数据传输	施工区域临时监测、地质灾害应急响应	山地地形：部署时选平坦开阔地，斜坡用三角支架固定调平，注意天线朝向；多路径效应、植被干扰影响精度，恶劣天气禁用。水域地形：部署于高处稳固处，船上部署需固定减震；做好防水防潮，处理反射信号干扰，气象不佳时监测效果差

## 4.3 监测方法

### 4.3.1 固定监测

4.3.1.1 边坡雷达监测设备应长期固定于监测点位。

4.3.1.2 数据采集频率应根据监测对象类型及风险等级实施差异化设置，具体要求如下：

#### a) 边坡监测：

- 1) 高风险边坡：存在明显变形迹象、地质条件复杂或处于强降雨、地震活动频繁区域的边坡，数据采集频率应 $\geq 1$ 次/15分钟，实时掌握边坡动态变化，及时预警潜在滑坡风险。
- 2) 中风险边坡：地质条件相对稳定，但存在一定滑坡可能性的边坡，数据采集频率应 $\geq 1$ 次/小时，定期监测边坡位移、形变趋势。
- 3) 低风险边坡：地质结构稳定，短期内无明显灾害风险的边坡，数据采集频率应设置为 $\geq 1$ 次/4小时，在保障安全的前提下降低监测成本。

#### b) 结构体监测：

- 1) 高风险结构体：处于老化阶段、承载负荷超出设计标准或遭受过灾害影响的结构体，数据采集频率应 $\geq 1$ 次/30分钟，密切监测结构体关键部位的应力、形变情况，预防结构坍塌事故。
- 2) 中风险结构体：正常使用但存在部分隐患的结构体，数据采集频率应 $\geq 1$ 次/2小时，跟踪结构体状态变化，及时发现异常发展趋势。
- 3) 低风险结构体：新建或状态良好、无明显安全隐患的结构体，数据采集频率应设置为 $\geq 1$ 次/6小时，定期核查结构体稳定性。

4.3.1.3 应适用于重点区域的连续稳定性监测。

### 4.3.2 移动监测

4.3.2.1 应采用便携式雷达设备。

4.3.2.2 应根据工程需求临时部署。

4.3.2.3 应支持局部区域的高密度扫描与快速响应。

### 4.3.3 连续监测

- 4.3.3.1 数据应实时上传至云端平台。
- 4.3.3.2 应通过预设算法自动触发预警信号。
- 4.3.3.3 系统响应时间应 $\leq 5$ 分钟。

### 4.3.4 定期监测

- 4.3.4.1 应按预设周期（如每周1次或每月1次）采集数据。
- 4.3.4.2 应用于工程维护与长期趋势分析。

## 5 监测设备要求

### 5.1 性能指标

性能指标应符合下表要求：

表 2 性能指标汇总表

参数	技术指标
工作频率	X波段（8-12GHz）或Ku波段（12-18GHz）
空间分辨率	水平 $\leq 1\text{m}$ ，垂直 $\leq 1\text{mm}$
最大监测距离	地基雷达 $\geq 5\text{km}$ ，机载雷达 $\geq 10\text{ km}$
测量精度	静态目标 $\leq 0.5\text{mm}$ （RMSE），动态目标 $\leq 1\text{mm}$
数据采集速率	$\geq 1$ 次/分钟（应急模式）， $\geq 1$ 次/小时（常规模式）
环境适应性	工作温度 $-30^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ ，防护等级IP67
功耗	地基雷达：正常工作模式下 $\leq 200\text{W}$ ，待机模式下 $\leq 10\text{W}$ 机载雷达：正常工作模式下 $\leq 500\text{W}$ ，待机模式下 $\leq 20\text{W}$

### 5.2 安装与调试

#### 5.2.1 选址要求

- 5.2.1.1 地基雷达设备与强电磁干扰源的水平距离应不小于30m，垂直距离应不小于15m，当无法满足上述距离要求时，应采取电磁屏蔽、滤波等技术措施降低干扰影响，并通过现场测试验证监测数据的有效性和稳定性。
- 5.2.1.2 地基雷达安装位置选择，其测量控制点的建立、点位精度要求等应符合GB/T 50026-2020中平面控制测量与高程控制测量的相关规定。
- 5.2.1.3 机载雷达飞行高度应 $\geq 100\text{m}$ ，飞行路径应避开禁飞区；当监测目标为大面积滑坡区域、广袤的交通干线或大型水利枢纽等，地形相对平坦开阔时，飞行高度应在500-1000m；针对小型桥梁、独立建筑物等精细化监测目标，若地形条件允许，飞行高度应在100-300m；在山地地形监测时，飞行高度应依据山体高度、坡度和地形复杂程度灵活调整。

#### 5.2.2 校准流程

##### 5.2.2.1 初始校准

安装后应使用标准靶标进行基线校准，误差应 $\leq \pm 0.2\text{ mm}$ 。

##### 5.2.2.2 周期性校准

每季度应进行一次设备性能测试，校准记录保存应 $\geq 5$ 年，并应符合GB/T 18894-2016的相关规定。

### 5.3 维护与保养

#### 5.3.1 日常维护

- 5.3.1.1 应每周检查电源模块、通信链路及存储设备状态。

5.3.1.2 应定期清洁雷达天线表面，使用干净、柔软的毛刷轻轻刷去天线表面的灰尘等松散附着物；对于难以去除的污垢，宜选用干净、柔软的布，蘸取适量清水或专用中性清洁剂（避免使用含有酸性或碱性成分的清洁剂，以防损坏天线表面），应轻轻擦拭天线表面；擦拭完成后，应使用干净的干布将天线表面擦干，且应确保无水渍残留。

5.3.1.3 应避免使用高压水枪、尖锐物体等可能损伤天线的工具进行清洁。

5.3.1.4 每季度应对雷达设备软件版本进行检查，确认软件版本与设备运行需求匹配，及时更新至官方发布的稳定版本，更新前需备份监测数据及系统配置文件，更新后应进行功能测试，确保软件运行正常、数据采集与传输无误。

5.3.1.5 每半年应对设备机械结构进行润滑与紧固，防止因振动导致精度下降。

## 5.3.2 故障处理

5.3.2.1 设备异常时应记录故障代码。

5.3.2.2 应在 24 小时内联系技术支持。

5.3.2.3 故障记录应保留 $\geq 3$ 年。

## 6 数据采集与处理

### 6.1 数据采集要求

#### 6.1.1 数据格式

6.1.1.1 原始数据存储为 HDF5 格式，字段应包括以下内容：

- a) 时间戳（UTC 格式）；
- b) 三维坐标（WGS-84 坐标系）；
- c) 位移量（单位：mm）；
- d) 信噪比（ $\text{SNR} \geq 20$  dB）；
- e) 监测设备编号。

6.1.1.2 元数据应标注监测区域的以下信息：

- a) 名称；
- b) 设备型号；
- c) 操作人员；
- d) 环境参数（温度、湿度、风速）。

#### 6.1.2 采集频率

6.1.2.1 连续监测模式下，数据采集频率应 $\geq 1$ 次/小时。

6.1.2.2 应急模式下，数据采集频率应 $\geq 1$ 次/分钟，系统响应时间应 $\leq 5$ 分钟，且应符合 GB 50330 的相关规定。

### 6.2 数据处理流程

#### 6.2.1 预处理

##### 6.2.1.1 滤波去噪

应采用小波变换（Daubechies 小波基）消除高频噪声，或卡尔曼滤波平滑动态数据；也宜根据数据特征选择以下方法：

- a) 中值滤波：适用于去除数据中存在的椒盐噪声（离散的脉冲干扰），对边坡位移突变异常值的抑制效果显著，能有效保留数据边缘特征，不影响监测数据的真实趋势；
- b) 高斯滤波：常用于处理服从高斯分布的噪声，在结构体表面微小振动产生的连续型噪声抑制上表现良好，可通过调整高斯核的标准差控制平滑程度，兼顾数据平滑与细节保留；
- c) 维纳滤波：当已知噪声和信号的统计特性时，该方法能基于最小均方误差准则实现最优滤波，适用于对历史监测数据特征较为明确的边坡或结构体，可精准恢复原始信号。

##### 6.2.1.2 大气校正

应利用气象数据（温度、气压、湿度）修正大气延迟误差，提升干涉测量精度。

## 6.2.2 三维建模

6.2.2.1 应结合地理信息系统（GIS）数据与雷达形变场，构建三维形变模型。

6.2.2.2 空间分辨率应 $\leq 1\text{m}$ ，高程精度应 $\leq 3\text{mm}$ ，且应符合 GB/T 50269-2015 的相关规定。

6.2.2.3 宜使用 ArcGIS、Global Mapper、Blender 等软件进行三维建模。

## 6.2.3 数据可视化

### 6.2.3.1 形变速率图

应采用红-黄-绿色阶表示形变速率范围（ $-5\text{mm/d}$ 至 $+5\text{mm/d}$ ）。

### 6.2.3.2 时间序列图

应展示关键点位移随时间的变化趋势，图表应标注置信区间（95%置信水平）。

## 7 监测结果评估与预警

### 7.1 评估标准

评估标准应符合下表内容：

表 3 评估标准汇总表

风险等级	形变量 (mm)	形变速率 (mm/d)	响应措施
低风险	$\leq 10$	$\leq 0.5$	记录数据，每季度复查
中风险	10~30	0.5~1.0	加密监测（频率 $\geq 1$ 次/小时）
高风险	$\geq 30$	$\geq 1.0$	立即疏散，启动工程加固

### 7.2 预警机制

7.2.1 预警等级划分应符合以下要求：

- 黄色预警：形变速率 $\geq 0.5 \text{ mm/d}$ 或形变量 $\geq 10 \text{ mm}$ ，应人工核查数据并提交分析报告；
- 橙色预警：形变速率 $\geq 1.0 \text{ mm/d}$ 或形变量 $\geq 30 \text{ mm}$ ，应通知责任单位启动应急预案，应急预案编制应参考 GB/T 29639-2020 的相关规定；
- 红色预警：形变速率 $\geq 2.0 \text{ mm/d}$ 或形变量 $\geq 50 \text{ mm}$ ，应立即疏散人员并封锁危险区域，同时应上报主管部门，响应措施应符合 GB/T 37228-2018 的相关规定。

7.2.2 预警信息发布应符合以下要求：

- 应通过短信、平台弹窗、声光报警等多渠道实时推送预警信息；
- 信息内容应包括监测点位置、风险等级、建议措施及联系人信息；
- 应采用统一的信息发布管理系统，对预警信息进行集中编辑、审核与分发；
- 应记录每次信息发布的内容版本，便于追溯和管理。

### 7.3 监测报告要求

报告包含但不限于以下内容：

- 监测概况：监测时间、区域范围、设备型号、环境条件；
- 数据分析：形变量统计表、形变速率分布图、三维形变模型截图；
- 风险评估：风险等级判定依据、历史数据对比分析；
- 建议措施：加固方案、后续监测计划；
- 问题与处理：记录监测过程中遇到的技术问题。

### 7.4 格式规范

7.4.1 报告应采用 PDF/A 格式，图表分辨率应 $\geq 300\text{dpi}$ 。

7.4.2 电子文档管理应符合 GB/T 18894-2016 的相关规定。

7.4.3 纸质报告应加盖监测单位公章，并应存档 $\geq 10$ 年。

## 8 质量控制与安全管理

### 8.1 质量控制措施

#### 8.1.1 人员资质

8.1.1.1 操作人员应持有省级以上机构颁发的雷达监测技术认证证书。

8.1.1.2 每年宜参加 $\geq 24$ 学时培训（宜含理论8学时、实操16学时）。

8.1.1.3 操作人员应充分学习雷达设备的最新操作技巧、新型设备的使用方法，操作人员应熟练操作各类监测设备；还应包含数据处理方法，如数据分析软件的更新功能使用、数据异常的排查与处理技巧等。

#### 8.1.2 数据审核

8.1.2.1 监测数据应经双人独立复核，异常数据（如突变值、噪声超标）应标注原因并应重新采集。

8.1.2.2 明确数据质量报告应由项目负责人或质量管理人员进行审核，并签字确认。

8.1.2.3 每月应生成数据质量报告，内容应包括但不限于以下内容：

- a) 数据完整性；
- b) 精度统计；
- c) 异常处理记录。

#### 8.1.3 设备校验

每季度应使用标准靶标进行设备性能测试，校准记录保存应 $\geq 5$ 年。

### 8.2 安全管理要求

#### 8.2.1 设备安全

8.2.1.1 雷达设备应配备避雷装置（接地电阻 $\leq 4\Omega$ ）、防盗锁具及GPS或北斗追踪模块，安全设计应符合 GB 50343-2012 的相关规定。

8.2.1.2 应定期检查设备固定螺栓及支架稳定性，防止因强风或振动导致设备移位。

#### 8.2.2 作业安全

8.2.2.1 野外作业人员应穿、携带以下装备：

- a) 反光背心；
- b) 安全帽；
- c) 防滑鞋；
- d) 携带GPS或北斗定位仪；
- e) 应急通讯设备；
- f) 急救包。

8.2.2.2 在暴雨、雷电、大风（ $\geq 6$ 级）等恶劣天气条件下应暂停监测作业，恢复作业前，应对设备进行全面检查和对作业环境进行安全评估。