



\* \* \* \* \* 团体标准

\*\*\*\*\*\_\*\*\*\*\*

---

# InSAR 沉降监测预警规范

Code for InSAR settlement monitoring and early warning

XXXX- XX-XX 发布

XXXX- XX-XX 实施

\*\*\*\*\*

发布



## 目 录

前言 .....	III
1 总 则 .....	1
2 规范性引用文件 .....	2
3 术语、定义和缩略语 .....	3
3.1 术语和定义 .....	3
3.2 缩略语 .....	4
4 InSAR 监测技术 .....	5
4.1 数据获取及处理 .....	5
4.2 CR-InSAR 辅助监测 .....	5
4.3 成果质量与验收 .....	6
5 风险筛查 .....	7
5.1 房屋建筑 .....	7
5.2 桥梁工程 .....	7
5.3 道路工程 .....	8
5.4 水库大坝 .....	8
5.5 边坡工程 .....	9
5.6 铁路工程 .....	9
5.7 燃气管线 .....	10
6 现场核查 .....	11
6.1 房屋建筑 .....	11
6.2 桥梁工程 .....	12
6.3 道路工程 .....	13
6.4 水库大坝 .....	13
6.5 边坡工程 .....	14
6.6 铁路工程 .....	15
6.7 燃气管线 .....	16
7 预警 .....	17
7.1 房屋建筑 .....	17
7.2 桥梁工程 .....	17
7.3 道路工程 .....	18
7.4 水库大坝 .....	20
7.5 边坡工程 .....	20
7.6 铁路工程 .....	21
7.7 燃气管线 .....	21
8 处置措施 .....	22
8.1 房屋建筑 .....	22
8.2 桥梁工程 .....	22
8.3 道路工程 .....	22
8.4 水库大坝 .....	22

8.5 边坡工程 .....	22
8.6 铁路工程 .....	23
8.7 燃气管线 .....	23
附录 A (资料性附录) 不同类型 InSAR 技术适用情况表 .....	24
附录 B (资料性附录) 目前可用星载 SAR 数据表 .....	25
附录 C (资料性附录) InSAR 监测技术简介 .....	26
C.1 InSAR 技术原理与特点 .....	26
C.2 SAR 数据获取 .....	27
C.3 数据处理 .....	28
C.4 数据处理成果要求 .....	35

国家标准

# 前 言

本规范按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

请注意本规范的某些内容涉及专利。本规范的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规范由深圳市城市公共安全技术有限公司提出。

本规范起草人：张少标、董方、岳卿瑞、金典琦、张会、李焱、饶杨安、金松燕、黎莉、郜志超、秦敢、刘玉珂、钟儒勉。

本规范为首次发布。



# 1 总 则

1.0.1 本规范规定了InSAR沉降监测的技术流程、风险筛查、现场复核、预警、建议措施等。

1.02 本规范适用于房屋建筑、桥梁、道路、水库大坝、边坡、铁路、燃气管线七类监测对象在正常使用状态下的沉降监测预警，主要涵盖在长时间序列中能够对雷达波保持较强且稳定散射特性的地物（如建筑物、大坝、岩体、地面轨道、路灯和人工角反射器等硬目标）。

## 2 规范性引用文件

2.0.1 下列文件对于本规范的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本规范。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

GB 50497-2009 建筑基坑工程监测技术规范

GB 50982-2014 建筑与桥梁结构监测技术规范

TB10621-2014 高速铁路设计规范

JTG/T H21-2011 公路桥梁技术状况评定标准

JGJ 8-2016 建筑变形测量规范

JGJ125-2016 危险房屋鉴定标准

SL 274-2020 碾压式土石坝设计规范

GB/T 40112-2021 地质灾害危险性评估规范 DZT 0284-2015 地质灾害排查规范

SJG 41-2017 深圳市既有房屋结构安全隐患排查技术标准

T/CAGHP 013-2018 地质灾害地InSAR监测技术指南（试行）

DD 2014-11 地面沉降干涉雷达数据处理技术规范

## 3 术语、定义和缩略语

### 3.1 术语和定义

#### 3.1.1 合成孔径雷达干涉测量 interferometric synthetic aperture radar, InSAR

利用同一地区不同期次SAR数据中的相位信息进行干涉测量的技术。

#### 3.1.2 角反射体合成孔径雷达干涉测量 corner reflector InSAR, CR InSAR

一种辅助的InSAR监测技术,是一种基于人工布设硬目标点的时间序列形变监测手段。

注:通常在关注区域架设一定数量尺寸、规格统一的人工角反射体,这些角反射体位置稳定,对雷达波反射较强,多用于解决在植被覆盖低相干区域难以提取有效测量点问题和InSAR监测结果的精度验证。CR点的后向散射强度要远远大于周围的地物,在SAR图像上会呈现一个个明显的亮点,可以有效提取这些CR点,通过这些点的相位变化获取高精度的形变信息。

#### 3.1.3 差分合成孔径雷达干涉测量 differential InSAR

对干涉相位进行差分处理,去除地形、平地等相位分量以测量地面形变的干涉测量方法。

#### 3.1.4 永久散射体干涉测量 persistent scatterer InSAR

利用长时间序列SAR影像集进行时间和空间域形变量估算,以提取永久散射体形变信息的干涉测量方法。

#### 3.1.5 风险筛查 risk screening

根据InSAR长期沉降监测结果,初步筛选监测目标的异常沉降点及区域。

#### 3.1.6 现场核查 on-site inspection

根据筛查结果,对异常沉降点及区域进行实地踏勘,结合监测目标的表现及周边环境变化,核查监测数据的有效性及目标的安全性。

### 3.1.7 预警 early warning

结合沉降监测数据及现场核查，判定监测目标的安全状态，参考相关规范及经验值发出不同等级的风险预警，提示各方共同关注风险发展态势。

## 3.2 缩略语

CR: 人工角反射器

CR-InSAR: 角反射体合成孔径雷达干涉测量

DEM: 数字高程模型

DTIN: 狄洛尼三角网

FFT: 快速傅里叶变换

LOS: 视线向

PS: 永久散射体

PS-InSAR: 永久散射体合成孔径雷达干涉测量

RCS: 雷达反射截面积

SAR: 合成孔径雷达

SRTM: 航天飞机记载干涉雷达测地任务

## 4 InSAR 监测技术

### 4.1 数据获取及处理

4.1.1 InSAR 数据获取及处理内容及要求应符合 T/CAGHP、DD2014-11 的规定。

### 4.2 CR-InSAR 辅助监测

4.2.1 针对植被茂密等低相干甚至失相干研究区域的地表形变监测研究（道路边坡、地震、滑坡、地裂缝等），应采用人工角反射器干涉测量技术。

4.2.2 CR 设计与制作应满足以下要求：

1 角反射器应使用铝质材料，外加镀锌铁皮，相接处采用三角钢和铆钉固定角反射器；

注：根据项目需求，综合材料方面的散射效率的考虑，一般选择角反射器直角边长为 1m 铝质材料，因为铝具有很高的介电系数，厚度为 3mm，边侧加 2cm 折边增加强度，同时外加镀锌铁皮（1mm 厚）以保护反射面（铝板），相接处采用三角钢和铆钉固定角反射器，埋设于水泥墩，既起稳定作用，也起定位作用。

2 角反射器表面应无应力、平整度好、反射性强；

3 角反射器各边边长、相邻反射面之间的夹角应满足设计要求，边长误差不超过 1cm，角度误差不超过 1°；

4 对角反射器的顶点处应预留三个钻孔（需避开像元中心），可以使雨水、杂物自动流出。

4.2.3 CR 选点应满足以下要求：

1 角反射器布设位置应选择监测区域内背景反射强度较小的区域，需固定在稳定且长期受保护的区域，保证基座稳定；

2 安装点应位于有植被覆盖并远离背景强反射体的地方，呈“十”字形或者“井”字形布设，滑坡（边坡）中轴线应至少布设 3 个以上 CR 点，距离滑坡体不大于 1km 的稳定区至少布设 2 个 CR 点，尽量使角反射器的强反射能突出的显示在图像上；

3 CR 点应选在具有变形代表性的区域，固定在地表，基座用水泥浇筑。

4 CR 安装环境应满足以下要求：

5 CR 点位应远离大功率无线电发射源和高压输电线，距离分别不小于 200m 和 100m，对于多路径散射物体，距离一般大于 100m；

6 CR 点位附近不应有强烈干扰卫星信号的物体，并应远离镜面建筑物，正对的坡面强反射体。

4.2.4 角反射器识别与解算主要限制因素包括：

1 在重复观测期间，地表覆盖的变化造成的时间去相干；

2 在重复观测期间，由于大气状况的不同而引起的相位变化。

4.2.5 监测区域内应存在足够数量的 PS 点，这些 PS 点在重复观测期间内，其 RCS 基本上不发生变化，即保持了很高的相干性。

### 4.3 成果质量与验收

4.3.1 InSAR 监测成果质量检查和验收的内容及要求应符合 T/CAGHP 013-2018（试行）、DD2014-11 的规定。

## 5 风险筛查

### 5.1 房屋建筑

5.1.1 InSAR 监测技术宜优先选择房屋建筑以下部位的沉降数据进行分析：

- 1 单体建筑的外墙凸出处；
- 2 屋面与外墙交接处、屋面凸出处；
- 3 建筑抗震缝或沉降缝两侧的结构单元分隔处；
- 4 高低层建筑交接处。

5.1.2 结合 InSAR 技术特点及实际应用情况，本规范选取 2 项指标，即近 3 年累计沉降量、近 2 个月平均沉降速率，作为房屋建筑风险筛查标准，具体见表 5.1.2。

表 5.1.2 房屋建筑 InSAR 沉降监测风险筛查标准

序号	筛查指标	规范值	筛查值	参考依据
1	近 3 年房屋累积沉降量/mm	/	15~20	建议：填海区域、软弱覆土层较厚区域取高值；岩土条件良好区域取低值。
2	近 2 个月平均沉降速率/mm/月	4	2~4	JGJ125-2016
注：累计沉降指房屋建筑PS点叠加后的计算最大沉降值；				

5.1.3 结合 InSAR 沉降监测结果，同时满足表 5.1.2 中 2 项指标的房屋建筑应进行现场核查，进一步确认安全风险。

### 5.2 桥梁工程

5.2.1 InSAR 监测技术宜优先选择桥梁工程以下部位的沉降数据进行分析：

- 1 上部结构；
- 2 墩台。

5.2.2 结合 InSAR 技术特点及实际应用情况，本规范选取 2 项指标，即近 1 年累计沉降量、近 3 年累计沉降量，作为桥梁工程风险筛查标准，具体见表 5.2.2。

表 5.2.2 桥梁工程 INSAR 沉降监测风险筛查标准

序号	沉降监测项	筛查指标	筛查值	
			近1年累积沉降量/mm	近3年累积沉降量/mm
1	混凝土梁桥	跨中	0.50L	0.83L
		悬臂	1.00L	1.67L
2	钢梁桥、钢拱桥	简支/连续板梁	0.63L	0.83L
		简支/连续桁架	0.50L	0.63L
3	刚架拱桥		0.50L	0.63L
4	钢-混凝土组合拱桥		0.50L	0.63L
5	悬索桥、斜拉桥	预应力混凝土加劲梁	0.63L	1.00L
		钢桁架加劲梁	0.42L	0.63L
		钢箱加劲梁	0.83L	1.25L
6	简支梁桥	墩台总沉降	$5\sqrt{L}$	$10\sqrt{L}$
		相邻墩台沉降差值	$2.5\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$

注：L—相邻墩台间的净跨径或悬臂部分净长度，以m为单位，小于25m时仍以25m计。

结合 InSAR 沉降监测结果，满足表 5.2.2 中任一指标的道路工程应进行现场核查，进一步确认安全风险。

## 5.3 道路工程

5.3.1 InSAR 监测技术宜优先选择道路工程车行道路面的沉降数据进行分析。

5.3.2 结合 InSAR 技术特点及实际应用情况，本规范选取 2 项指标，即近 3 年累计沉降量、近 2 个月平均沉降速率，作为道路工程风险筛查标准，具体见表 5.3.2。

表 5.3.2 道路工程 InSAR 沉降监测风险筛查标准

序号	筛查指标	筛查值	备注
1	近3年道路累计沉降量/mm	20~30	累计值的起点不小于施工结束后2年；道路等级低、柔性路面取高值；道路等级高、刚性路面取低值。
2	近2个月平均沉降速率/mm/月	8~10	

结合 InSAR 沉降监测结果，同时满足表 5.3.2 中 2 项指标的道路工程应进行现场核查，进一步确认安全风险。

## 5.4 水库大坝

5.4.1 InSAR 监测技术宜优先选择水库大坝坝顶平面的沉降数据进行分析。

5.4.2 结合 InSAR 技术特点及实际应用情况，本规范根据水库大坝累计沉降量及沉降发展趋势作为水库大坝风险筛查标准，具体见表 5.4.2。

表 5.4.2 水库大坝 InSAR 沉降监测风险筛查标准

序号	大坝类型	筛查指标	筛查标准
1	土石坝	累计沉降量	≥30mm
		沉降发展趋势	沉降持续发展增大，且不收敛
<p>注1：本筛查标准仅适用于碾压式土石坝，鉴于初蓄期各水库大坝均有详细监测资料，本筛查标准不包含初蓄期水库大坝。</p> <p>注2：累计沉降量为运营期一年期监测的总沉降量。</p>			

结合 InSAR 沉降监测结果，同时满足表 5.4.2 中 2 项指标的水库大坝应进行现场核查，进一步确认安全风险。

## 5.5 边坡工程

5.5.1 InSAR 监测技术宜优先选择能反应边坡工程最大变形部位的沉降数据进行分析：

- 1 坡顶后方一倍坡高范围内地面及设施；
- 2 坡顶截水沟、坡面格构梁等。

5.5.2 结合 InSAR 技术特点及实际应用情况，本规范选取 3 项指标，即近 3 年累计沉降、近 1 年最大沉降速率，作为边坡风险筛查标准，具体见表 5.5.2。

表 5.5.2 边坡 InSAR 沉降监测风险筛查标准

序号	筛选指标	规范值	筛查值	参考依据
1	近 3 年累计沉降量/mm	30~80	20	GB50497 对基坑边坡的相关规定，InSAR 和传统监测案例
2	近 1 年最大沉降速率/mm/时间	4-10 (mm/d)	3 (mm/月)	
注：累计沉降量、最大沉降速率应剔除因季节、气温影响导致的波动				

结合 InSAR 沉降监测结果，同时满足表 5.5.2 中 2 项指标的边坡工程应进行现场核查，进一步确认安全风险。

## 5.6 铁路工程

5.6.1 InSAR 监测技术宜优先选择铁路工程以下部位的沉降数据进行分析：

- 1 在曲线地段直缓、缓圆、曲线中点、圆缓、缓直等部位；
- 2 道岔理论中心、道岔前端、道岔后端、辙叉理论中心等结构部位；

- 3 线路结构的沉降缝和变形缝、车站与区间衔接处、区间与联络通道衔接处、附属结构与线路结构衔接处等；
- 4 隧道、高架桥梁与路基之间的过渡段；
- 5 地基或围岩采用加固措施的轨道交通线路结构或附属结构部位；
- 6 线路结构存在病害或处于软土地基等部位。

5.6.2 结合 InSAR 技术特点及实际应用情况，本规范选取 2 项指标，即累计沉降量、沉降速率，作为铁路工程风险筛查标准，具体见下表 5.6.2。

表 5.6.2 铁路工程 InSAR 沉降监测风险筛查标准

序号	沉降监测项	筛查指标	规范值	筛查值	参考依据
1	无砟轨道	近 3 年累计沉降量/mm	15	10	TB 10621
		连续 2 个月沉降速率/mm/月	/	1	TB 10621
2	有砟轨道	近 3 年累计沉降量/mm	80~100	40~60	TB 10621
		连续 2 个月平均沉降速率/mm/月	2~4	2	TB 10621

注：累计沉降量是指施工后沉降累计量

结合 InSAR 沉降监测结果，同时满足表 5.6.2 中 2 项指标的铁路工程应进行现场核查，进一步确认安全风险。

## 5.7 燃气管线

5.7.1 InSAR 监测技术宜优先选择高压、次高压燃气管线上部区域地表的 2 项监测指标，即近 3 年累计沉降量、近 2 个月沉降速率，作为此两类管线的风险筛查建议标准，具体见表 5.7.1。

表 5.7.1 燃气管线 InSAR 沉降监测风险筛查标准

序号	沉降监测项	筛查指标	筛查值
1	高压、次高压燃气管线上部区域地表	近 3 年累计沉降量/mm	-10 (隆起量) +10 (沉降量)
		连续 2 个月沉降速率/mm/月	2

结合 InSAR 沉降监测结果，同时满足达到表 5.7.1 中 2 项指标的高压、次高压燃气管线应进行现场核查，进一步确认安全风险。

## 6 现场核查

### 6.1 房屋建筑

6.1.1 针对满足风险筛查标准的房屋建筑，应从工程资料、场地、地基基础和上部结构四个方面开展现场核查：

1 房屋建筑的工程资料应包含以下内容：

- 1) 房屋基本情况：包含房屋名称、建造时间、层数、基础类型、结构形式、使用功能等；
- 2) 房屋安全证明资料：包含房产证明、竣工验收证明、加固改造验收证明；
- 3) 房屋图文资料：设计图纸、加固改造图纸、施工资料；
- 4) 房屋使用资料：包括使用过程中遭受的灾害，维修、加固、改造等相关资料；
- 5) 房屋结构安全隐患排查报告、房屋结构检测鉴定报告等。

2 房屋建筑场地的排查或检查应包含以下内容：

- 1) 周边是否存在高大边坡、挡墙、河堤护坡等（与既有建筑的水平距离在其2倍高度以内）、边坡、挡墙等是否出现明显的裂缝、变形等损伤情况；
- 2) 房屋建筑是否在自然灾害（崩塌、滑坡、地面沉降、地面塌陷、山洪、泥石流、水土流失）、采空区以及病险库等的影响范围内。有必要时，上述问题可委托专业技术机构进行专项评估。
- 3) 房屋建筑地基基础应重点排查或检查因地基不均匀沉降产生的整体倾斜、开裂和基础滑移等内容；

3 房屋建筑地基基础和上部结构的排查或检查应包含以下内容：

- 1) 钢筋混凝土房屋应重点检查柱、剪力墙、梁、板和悬挑构件的变形、裂缝、混凝土腐蚀、露筋和钢筋锈蚀等状况。
- 2) 砌体房屋应重点检查砌体墙、柱、梁、板和悬挑构件的变形、裂缝、腐蚀、钢筋锈蚀等状况。

- 3) 钢结构柱顶有无明显位移,屋架或钢梁有无明显下挠,钢梁有无明显侧向弯曲,钢结构构件或其连接是否有裂缝或锐角切口,焊缝、螺栓、铆接是否出现拉开、变形、滑移或剪断等损伤,钢结构承重构件是否因锈蚀产生锈皮或锈坑。
- 4) 土石房屋墙体是否发生明显的倾斜、挠曲或出现通缝;墙体或砖柱表面是否明显风化、剥落;屋面梁或屋架支撑处墙体是否开裂明显;木屋架节点是否松动、滑移或开裂,铁件是否严重锈蚀、松动;瓦屋面是否出现明显的塌陷。

## 6.2 桥梁工程

6.2.1 针对满足风险筛查标准的桥梁工程,应从工程资料、场地、地基基础和上部结构四个方面开展现场核查:

1 桥梁的工程资料应包含以下内容:

- 1) 桥梁基本情况:包含名称、建造时间、基础类型、结构形式、使用功能等;
- 2) 桥梁图文资料:设计图纸、加固改造图纸、施工资料;
- 3) 桥梁使用资料:包括使用过程中遭受的灾害,维修、加固、改造等相关资料;
- 4) 桥梁结构安全隐患排查报告、桥梁养护管理台账、桥梁结构检测鉴定报告等。

2 在对桥梁现场核查过程中,对不同类型桥梁的主要部位,应重点关注以下沉降相关内容:

1) 梁式桥上部结构构件应重点关注以下内容:

- 混凝土梁式桥:跨中挠度,结构变位等;
- 钢梁桥:跨中挠度,结构变位等。

2) 拱式桥上部结构构件应重点关注以下内容:

- 圬工拱桥主拱圈:主拱圈变形,拱脚位移等;
- 圬工拱桥拱上结构:实腹拱的侧墙变形、位移,实腹拱的腹拱或横向联结系变形、错位等;
- 钢筋混凝土拱桥中板拱桥、肋拱桥和箱拱桥的主拱圈:主拱圈变形,拱脚位移等;
- 钢筋混凝土拱桥中板拱桥、肋拱桥和箱拱桥的拱上结构:实腹拱的侧墙与主拱圈脱裂,侧墙变形等;
- 双曲拱桥的主拱圈:主拱圈、横向联结系变形,拱脚位移等;
- 刚架拱桥的刚架拱片以及微弯板:跨中挠度,拱脚位移等;
- 钢拱桥:跨中挠度,结构变位,拱脚位移等。

- 3) 悬索桥主要构件应重点关注以下内容：
  - 预应力混凝土加劲梁：构件变形等；
  - 钢桁架加劲梁：构件变形，跨中挠度，结构变位等；
  - 钢箱加劲梁：构件变形，跨中挠度，结构变位等；
  - 索塔：倾斜变形，沉降评定等；
  - 锚碇：锚碇均匀沉降，水平位移等。
- 4) 斜拉桥主要构件应重点关注以下内容：
  - 主梁：构件变形，跨中挠度，结构变位等；
  - 索塔：沉降等。
- 5) 桥梁下部结构构件应重点关注以下内容：
  - 桥墩墩身：位移等；
  - 桥台台身：位移等。

### 6.3 道路工程

6.3.1 针对满足风险筛查标准的道路工程，应从以下方面开展现场核查：

- 1 工程资料内容：道路相关图文资料（竣工图、历史加建维修记录等）、沿线勘察资料、交通流量、地下水位变化情况；
- 2 路基核查内容：主要巡查路基稳定性，边坡损坏情况，路肩是否有杂物堆积，排水设施是否齐全畅通，挡土墙等路基构造物是否发生位移变形；
- 3 路面核查内容：主要巡查路面有无影响交通安全的堆积物、抛撒物、油污、积水、积雪等。路面是否有新出现影响交通安全的沉陷、坑槽、拥包、车辙、松散、翻浆、错台、各类井框与路面高差、剥落、啃边、缺失等明显病害。

### 6.4 水库大坝

6.4.1 针对满足风险筛查标准的水库大坝，应从以下方面开展现场核查：

- 1 坝体应包含一下内容：
  - 1) 坝顶：有无裂缝、异常变形；防浪墙有无开裂、挤碎、架空、错断、倾斜等；

- 2) 迎水坡：护面或护坡是否损坏；有无裂缝、剥落、滑动、隆起、塌坑、冲刷等；
- 3) 背水坡及坝趾：有无裂缝、剥落、滑动、隆起、塌坑、散浸、冒水或流土、管涌等现象；排水系统是否通畅；草皮护坡植被是否完好。

## 2 坝基和坝区应包含一下内容：

- 1) 坝基：基础排水设施的工况是否正常；渗漏水的水量有无变化；基础廊道是否有裂缝、渗水等现象；
- 2) 坝端：坝体与岸坡连续处有无裂缝、错动、渗水等现象；两岸坝端区有无裂缝、滑动、崩塌、溶蚀、隆起、塌坑、异常渗水和蚁穴等；
- 3) 坝趾近区：有无阴湿、渗水、管涌、流土或隆起等现象；排水设施是否完好；
- 4) 坝端岸坡：绕坝渗水是否异常；有无裂缝、滑动迹象；护坡有无隆起、塌陷或其他损坏现象。

## 6.5 边坡工程

6.5.1 针对满足风险筛查标准的边坡工程参照 DZT0286、DZT0284 标准执行，应从以下方面开展资料收集、现场核查、记录：

- 1 边坡基本情况：通过收集相关边坡信息表格、边坡勘察、设计、施工资料以及边坡日常巡查台账、地质地形资料和现场调查，获取并记录相关情况。
  - 1) 坡体周边环境：设施分布，人员活动，加载、挖方、排水等影响；
  - 2) 坡长、坡高、坡度；
  - 3) 坡体岩土体组成与状态：岩质、土质、岩土混合，地层与岩性名称，根据区域地质资料、地形地貌、现场目测确定；岩石风化程度、节理裂隙发育情况、结构面与坡面关系，土体密实程度，根据现场目测确定，坡面完全覆盖的记录附近的露头情况；
  - 4) 坡面坡体加固防护情况：坡体分级情况；坡体加固措施类型；坡面防护情况，植被覆盖情况；坡顶、坡中截水、排水、泄水情况；
  - 5) 地表、地下水情况：边坡及周边有无河道、沟渠、暗涵、管道、废水排放、等情况，影响坡体的汇水面积，分析其对坡体的影响；边坡及周边截排水沟、泄水孔、泉水泉眼、地面湿润、流水，结合近期降雨情况，确定水流与降雨的关系，对于渗出地下水，定性记录其流量、是否浑浊、是否夹杂沙土。
- 2 异常情况：通过收集资料、问询走访、现场调查，分析、记录各种异常情况。

- 1) 加载、扰动情况：可能影响坡体稳定的高大树木生长情况，比如土质高陡边坡上迎风或根基不稳的高大树木等；坡顶堆放物质、停放车辆、道路通行等加载情况；当前开挖、搭建等人为扰动情况；
  - 2) 人工活动、异常情况问询走访：收集资料，问询走访管理人员、周边人员，了解边坡开挖、支护、破坏等情况及发生其时期，边坡与周边有无变形破坏历史和现象，当前强降雨雨中、雨后雨水冲刷、崩塌破坏等情况；
  - 3) 边坡及周边变形破坏情况：现场调查坡体、支护结构、坡面的裂隙、裂缝、开裂、错动、外鼓、松动、掉落、崩塌、滑坡部位和大小；排水沟的堵塞、破坏情况；树木根系破坏岩土体、支护结构情况，树木倾斜、倒塌情况；坡顶、坡脚地面、设施变形破坏现象；
  - 4) InSAR 异常区域情况及成因：根据 InSAR 数据点分布、卫星影像、地面实际情况确定 InSAR 异常区域对应的位置和设施；检查对应区域变形破坏迹象；对比 InSAR 异常区域、一般区域，结合岩土体性质、设施结构和材料性质，分析 InSAR 异常的成因，判断是否为表面扰动引起，判断是否为坡体、支护结构、截排水结构、周边设施变形破坏引起，对于无肉眼可察觉的破坏迹象情况，判断是否发生连续或均匀的变形。
- 3 稳定性、风险隐患情况：综合分析调查成果，分析、预测边坡及其他设施的稳定性、风险隐患。
- 1) 边坡稳定性、风险隐患：综合以上情况确定边坡的稳定性，结合周边环境，分析、预测其安全风险、防护治理隐患；
  - 2) 其他风险隐患：对于与边坡稳定不直接相关的其他设施变形破坏，分析、记录其风险隐患。

## 6.6 铁路工程

6.6.1 针对满足风险筛查标准的铁路，应从以下方面开展资料收集、现场核查：

- 1 资料收集：沿线铁路的竣工资料、养护台账、沿线勘察报告、沿线周边环境变化情况。
- 2 现场核查主要内容：

- 1) 铁路路基及附近有无塌陷、松动、积水；
- 2) 铁轨固定螺丝有无松动，卡扣有无断裂、严重变形；
- 3) 枕木在螺丝铆钉的部位有无损坏、裂缝；枕木整体是否损坏、裂纹；
- 4) 枕木与周围路基泥土之间有无缝隙；
- 5) 铁轨水平方向有无凹陷；
- 6) 电线杆有无扭转、歪斜、基础下沉、损伤。

## 6.7 燃气管线

6.7.1 针对满足风险筛查标准的高压、次高压燃气管线，应从以下方面开展现场核查：

- 1 资料收集：燃气管线的竣工资料、养护台账、沿线勘察报告、沿线覆土情况、沿线地块的规划资料等；
- 2 现场核查主要有以下内容：
  - 1) 管线是否存在漏等现象；
  - 2) 管线地面是否被违法占用，是否有违章搭建或不符合安全标准的建（构）筑物；
  - 3) 周边有无在建工程。

## 7 预警

### 7.1 房屋建筑

7.1.1 结合风险筛查及现场核查情况，综合判定房屋建筑的安全风险状态。出现以下情况之一时，应对房屋发出风险预警：

- 1 达到风险筛查标准，并经现场核查确认，但未达到本规范规定的危房判定标准时，即发起安全风险提示预警；
- 2 达到危房判定标准中预警判断条件 1 或预警判断条件 2 任一条件时，即发起危房预警。

7.1.2 本规范选取 2 项指标，即房屋整体倾斜率、承重构件开裂，作为房屋建筑现场核查的危房判定标准，见表 7.1.2。

表 7.1.2 房屋建筑现场核查的危房判定标准

序号	房屋高度 (Hg)	具体类型	规范判断条件 1: 房屋整体倾斜率	预警判断条件 1: 房屋整体倾斜率	规范判断条件 2: 房屋整体倾斜率+承重构件开裂	预警判断条件 2: 房屋整体倾斜率+承重构件开裂
1	单层或多层房屋 (Hg≤24m)	≤2 层	30‰	18‰	房屋整体倾斜率>10‰, 且砌体结构或框架结构的主要承重构件产生了明显开裂 (砌体结构: 单条裂缝宽度>10mm; 或多条平行裂缝宽度>5mm)	房屋整体倾斜率>6‰, 且砌体结构或框架结构的主要承重构件产生了明显开裂 (砌体结构: 单条裂缝宽度>6mm; 或多条平行裂缝宽度>3.0mm)
		≥3 层	20‰	12‰		
2	高层建筑 (24m<Hg≤100m)	24m<Hg≤60m	7‰	4.2‰	上部承重结构构件及连接节点因沉降变形产生裂缝, 且房屋的开裂趋势仍在继续发展	上部承重结构构件及连接节点因沉降变形产生裂缝, 且房屋的开裂趋势仍在继续发展
		60m<Hg≤100m	5‰	3‰		
<p>注1: 预警指标取危房预警指标规范相应值的60%;</p> <p>注2: 整体倾斜数据在现场核查阶段通过其它监测方式获取;</p> <p>注3: 对房屋高度Hg&gt;100m的建筑和周边存在高大边坡、挡墙或泥石流等情况的建筑, 建议单独分析。</p>						

### 7.2 桥梁工程

7.2.1 结合风险筛查及现场核查情况，综合判定桥梁工程的安全风险状态。出现以下情况之一时，应对整座桥梁发出风险预警：

- 1 上部结构有落梁；或梁、板断裂现象；
- 2 梁式桥上部承重构件控制截面出现全截面开裂；或组合结构上部承重构件结合面开裂贯通，造成截面组合作用严重降低；
- 3 梁式桥上部承重构件有严重的异常位移，存在失稳现象；
- 4 结构出现明显的永久变形，变形值大于规范值；
- 5 关键部位混凝土出现压碎或杆件失稳倾向；或桥面板出现严重塌陷；
- 6 拱式桥拱脚严重错台、位移，造成拱顶挠度大于限制；或拱圈严重变形；
- 7 圯工拱桥拱圈大范围砌体断裂，脱落现象严重；
- 8 腹拱、侧墙、立墙或立柱产生破坏造成桥面板严重塌落；
- 9 系杆或吊杆出现严重锈蚀或断裂现象；
- 10 悬索桥主缆或多根吊索出现严重锈蚀、断丝。
- 11 斜拉桥拉索钢丝出现严重锈蚀、断丝，主梁出现严重变形；
- 12 扩大基础冲刷深度大于设计值，冲空面积达 20%以上；
- 13 桥墩（桥台或基础）不稳定，出现严重滑动、下沉、位移、倾斜等现象；
- 14 悬索桥、斜拉桥索塔基础出现严重沉降或位移；或悬索桥锚碇有水平位移或沉降；
- 15 其它。达到风险筛查标准，经现场核查确认未发现上述情况时，可根据实际情况选择加密养护巡查、开展监测等。

## 7.3 道路工程

7.3.1 结合风险筛查及现场核查情况，综合判定道路工程的安全风险状态。出现以下情况之一时，应对道路相关区段发出风险预警：

- 1 沥青路面发生以下情况：
  - 1) 坑槽：路面破坏成坑洼；
  - 2) 松散：路面结合料失去粘结力、集料松动；
  - 3) 拥包：路面局部隆起；
  - 4) 翻浆：路面、路基湿软出现弹簧、破裂、冒泥浆现象；
  - 5) 沉陷：路面、路基有竖向变形，路面下凹；
  - 6) 龟裂：块状不规则裂缝；

- 7) 网裂：缝宽 1mm 以上或缝距 40cm 以下，面积在 1 m<sup>2</sup> 以上的网状裂缝；
- 8) 车辙：路面上沿行车轮迹产生的纵向带状凹槽，深度 1.5cm 以上，数量按实有长度乘以变形部分的平均宽度。

## 2 水泥路面发生以下情况：

- 1) 沉陷：路面连续数块板下沉，低于相邻路面板平面的；
- 2) 严重破碎板：裂缝将整块面板分隔成三块以上，并有严重剥落或沉陷；
- 3) 坑洞：路面板粗集料脱落形成局部凹坑；
- 4) 板角断裂：裂缝与纵横相交将板角切断；
- 5) 露骨：路面板表面细集料散失、粗集料暴露；
- 6) 平整度差：用 3cm 直尺沿路面纵向每 100m 至少量三尺，尺底空隙在 8mm 以上的；
- 7) 错台：接缝处相邻两块板垂直高度差在 8mm 以上；
- 8) 唧泥：基层材料形成泥浆从接缝处或板边缘挤出，板底出现脱空，按挤出泥浆的接缝或板边长度计；
- 9) 裂缝：面板内较长的各种开裂；
- 10) 接缝养护差：接缝内无填缝料，或出现填缝料与板边脱落、凹陷在 1cm 以上的。

## 3 路基构造物发生以下情况：

- 1) 路基不整齐：路肩与路面衔接不平顺，低于路面或高于路面；横坡小于路面横坡；不平整、不密实影响横向排水；路肩宽度小于设计宽度；路肩外缘不顺适，宽度差有突变者；
- 2) 水沟淤塞：边沟、截水沟、排水沟有淤泥影响排水者，以及应有边沟路段而无边沟者；
- 3) 边坡坍塌：挖方边坡坍方 3 m<sup>2</sup> 以上，填方边坡有冲沟、缺口宽 30cm 上，边坡坡度陡于设计坡度；
- 4) 构造物损坏：挡墙等圬工体断裂、沉陷、倾斜、局部塌陷、松动、较大面积勾缝脱落者。

## 4 其它情况。

达到风险筛查标准，经现场核查确认未发现上述情况时，可根据实际情况选择加密养护巡查、开展监测等。

## 7.4 水库大坝

7.4.1 结合风险筛查及现场核查情况，综合判定水库大坝的安全风险状态。达到以下指标时应对水库大坝发出风险预警。水库大坝 InSAR 沉降监测预警分级标准见表 7.4.1。

表 7.4.1 水库大坝 InSAR 沉降监测预警指标

序号	监测项目	预警指标		判断依据
		年累计沉降量 S 总	月形变速率	
1	坝顶竖向位移	S 总≥50mm	≥10mm/月	SL274-2001 8.1.1 节条文说明

## 7.5 边坡工程

7.5.1 结合风险筛查标准及判定标准，综合判定边坡的安全风险状态。

1 出现以下情况之一时，应对边坡工程发出风险提示：

- 1) 根据 InSAR 监测判断边坡局部处于不稳定、较不稳定状态，存在一定危险性的：确定 InSAR 沉降异常与边坡及周边设施变形破坏相关，异常区域较小，周边有一定的人员、设施；且近 3 年累计沉降量 20-50mm，近 1 年最大沉降速率 3-6mm/月，并且沉降持续发展。
- 2) 根据现场核查宏观现象判断边坡局部处于不稳定、较不稳定状态，存在一定危险性的：边坡与周边设施出现局部、轻微的变形破坏现象，或边坡防护和维护不足，或轻微人为扰动，周边有一定的人员、设施。宏观现象包括但不限于裂缝、裂隙、松动、外鼓、掉块、淤塞等，高陡浆砌石挡墙、软岩土体边坡坡顶加载等。

2 出现以下情况之一时，应对边坡工程发出风险预警：

- 1) 根据 InSAR 监测判断边坡较大范围处于不稳定、较不稳定状态，存在较大危险性的：确定 InSAR 沉降异常与边坡及周边设施变形破坏相关，周边人员设施密集，异常区域较大；且近 3 年累计沉降量 50mm 以上或近 1 年最大沉降速率 6mm/月以上，并且沉降持续发展。
- 2) 根据现场核查宏观现象判断边坡较大范围处于不稳定、较不稳定状态，存在较大危险性的：边坡与周边设施出现大范围、严重的变形破坏现象，或强烈人为扰动，周边人员、设施密集。宏观现象包括但不限于裂隙、裂缝、开裂、错动、

外鼓、松动、掉落、崩塌、滑坡、严重堵塞，高陡浆砌石挡墙、软岩土体边坡坡顶大量堆载物质、重车停放、交通繁忙等。

## 7.6 铁路工程

7.6.1 结合风险筛查及现场核查情况，综合判定铁路工程的安全风险状态。具体如下：

1 出现以下情况之一时，应对铁路工程发出风险提示：

- 1) 根据 InSAR 数据判断铁路局部处于不稳定、较不稳定状态，存在一定危险性的：当铁路最近 3 年 InSAR 沉降量 8~10mm，沉降范围小于 15m 时，路基与轨道结构出现了离缝现象；
- 2) 根据现场核查宏观现象判断铁路局部处于不稳定、较不稳定状态，存在一定危险性的：宏观现象包括但不限于铁路存在钢轨、夹板、道岔、联结零件的松动、线路道岔尺寸超标、道床下沉等现象等。

b) 出现以下情况时应对铁路工程发出风险预警：

7.6.2 当铁路最近 3 年 InSAR 监测沉降量大于 10mm，沉降范围大于 15m 时，轨道面曲率半径增大时，即发出风险预警。

## 7.7 燃气管线

7.7.1 结合风险筛查及现场核查情况，综合判定燃气管线的安全风险状态。现场核查发现高压、次高压燃气管线周边存在地陷、裂缝、管道损伤、管道标志桩等现象时，应发出风险提示。

## 8 处置措施

### 8.1 房屋建筑

8.1.1 对于达到风险筛查标准、但不满足危房判定标准的房屋建筑，应密切关注监测数据变化及现场表观发展状况，视具体情况进行预警升级。

8.1.2 对于达到危房判定标准的房屋建筑，应结合相关规范要求，由专业机构及时开展鉴定及评估工作，视具体情况采取相应措施，如限制使用、加固、改造或拆除等。

### 8.2 桥梁工程

8.2.1 对于达到风险筛查标准、经现场核查确认未发现第七章所述严重影响结构安全问题的桥梁，应密切关注监测数据变化及现场表观发展状况，视具体情况进行预警升级。

8.2.2 对于已发出预警的桥梁工程，应由主管单位组织具有资质的专业机构及时开展桥梁技术状况评定工作。

### 8.3 道路工程

8.3.1 对已发出预警报告的道路，需组织相关具有资质的专业机构进行鉴定，根据鉴定结果对病害采取相应措施。

### 8.4 水库大坝

8.4.1 对于达到风险筛查标准、但不满足预警标准的水库大坝，应密切关注监测数据变化，并根据现场核查情况加强日常巡查维护。

8.4.2 对于达到预警标准的水库大坝，经现场核查，未发现坝体出现纵向或横向裂缝，应密切关注监测数据变化，或采取局部加固修复措施。

8.4.3 对于达到预警标准的水库大坝，经现场核查，发现坝体出现纵向或横向裂缝且存在漏水现象，应立即上报相关主管部门委托具有专业资质的机构针对坝体、坝基开展检测鉴定，并根据检测鉴定结论采取相应的除险加固措施，如有必要应做好人员撤离措施。

### 8.5 边坡工程

8.5.1 对于发出风险提示的边坡，应根据沉降、变形情况，采取清理、维护、修复措施，或纳入巡查排查、日常管理重点名单，或同时采取以上两个措施。

8.5.2 对于发出风险预警的边坡，由责任单位开展危险性评估，并确定是否采取治理加固等措施；对于根据沉降数据和变形破坏迹象可以明确判定变形破坏持续发展、临近重要设施场所的，立刻采取隔离警示、人员撤离、临时防护加固等应急措施。

## 8.6 铁路工程

8.6.1 对于达到风险筛查标准、经现场核查确认未发现第七章所述严重影响行车安全问题的道路，应密切关注监测数据变化及现场表观发展状况，视具体情况进行预警升级。

8.6.2 对于已发出预警的铁路工程，应由主管单位组织具有资质的专业机构及时开展铁路技术状况评定工作。

## 8.7 燃气管线

8.7.1 对已发出预警的燃气管线，应上报管线权属单位，具体应结合现场实际情况和相关工程资料开展下步工作。

## 附录 A

(资料性附录)

不同类型 InSAR 技术适用情况表

目前可使用的星载SAR数据见表A.1。

表 A.1 目前可用星载 SAR 数据表 这是表 B.1

星载 SAR 系统	Sentinel 1A/1B	ALOS-2(PALSAR-2)	RADARSAT-1/2	ENVISAT-ASAR	ALOS-PALSAR	TerraSAR-X/TanDEM-X	COSMO-SkyMed
所属国家/机构	欧空局	日本	加拿大	欧空局	日本	德国	意大利
运行时间	2014.4-	2014.5-	1:1995~ 2:2007~	2002~2012	2006~2011	2007~	2007~
轨道高度 (km)	693	628	790	800	691	514	620
波段 (cm)	C (5.6)	L (23.5)	C (5.6)	C (5.6)	L (23.5)	X (3.1)	X (3.1)
极化方式	HH+HV VV+VH	全极化	全极化	HH/VV	全极化	全极化	HH/VV
侧视角 (°)	20-45	8.0-70.0	23-65	15-45	8-50.8	20-55	19.7-45.5
轨道倾角 (度)	98.18	97.9	98.6	98.55	98.16	97.44	97.86
重复周期 (天)	12天(单星) 6天(双星)	14	24	35	46	11	16
影像幅宽 (km)	20-400	25-490	50-500	100-400	30-350	15-100	15-200
可否编程定制	需协商	是	是	是	否	是	是
应用特点	覆盖范围广, 周期短, 存档丰富, 主要为低分率模式,	覆盖范围广, 重复周期中, 波长较长, 植被观测有力, 价格相对较高、	2007年前唯一数据高分辨率中短波数据	存档数据丰富, 价格低, 覆盖历史时段长	覆盖范围广, 存档丰富, 适合高山峡谷地质灾害监测	轨道精度高, 数据质量好, 重复周期短	存档丰富, 数据质量好, 重复周期最短但是空间基线较长

## 附录 B

(资料性附录)

## 目前可用星载 SAR 数据表

InSAR技术适用条件如表B.1

表 B.1 不同类型 InSAR 技术适用情况表 这是表 A.1

方法	最少影像数 (景)	主要用途	精度/mm	监测应用条件
D-InSAR	2	地面沉降	10~30	适用时间间隔短和天气/季节接近, 以避免受到过多的时间去相干和大气的影晌。主要适宜于沉降趋势调查。
SBAS-InSAR	>8	地面沉降	<10	通过较多的 SAR 干涉组合, 获取地面沉降时间序列信息
PS-InSAR	>25	地面沉降	5	适用于时间间隔长、天气状况差异大。一般要求 25 景影像。PS 点要求城镇地区平均有 10 点/k m <sup>2</sup> ; 非城镇地区有 1 点/k m <sup>2</sup> 。可以获得 PS 点的形变时间序列, DEM 改正值和所有 SAR 影像的大气延迟量。

## 附录 C

(资料性附录)

### InSAR 监测技术简介

#### C.1 InSAR 技术原理与特点

##### C.1.1 技术原理

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术,根据地面目标的后向散射特性,把相位信息记录在复影像中,以此来获取地面三维信息.将两幅SAR影像进行干涉生成干涉图,生成的干涉图包含地形变化信息,随后再利用DEM数据进行相位模拟,模拟得到地形信息的条纹图 $\Phi_{sim,t}$ ,再将SAR影像干涉图与DEM模拟的条纹图叠加去除地表形变,得到地表形变信息,二轨法几何原理如图所示。

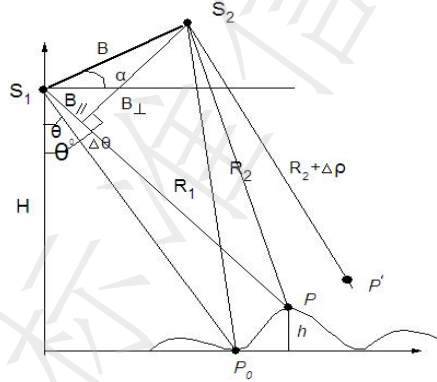


图 C.1 雷达干涉测量原理

如上图所示,假设地表形变的发生在传感器 $S_2$ 处成像时地表产生形变,即目标点发生形变后由 $P$ 点到了 $P'$ 点,由于目标点产生形变,视线也发生位移变化,视线方向发生的形变位移为 $R_2 + \Delta\rho$ 。可得到地表发生形变以后,目标点所对应的干涉相位为:

$$\varphi_{int} = -\frac{4\pi}{\lambda} [R_1 - (R_2 + \Delta\rho)] = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

等式中

$\frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho$  : 形变相位,

$\Delta\rho$ 表示形变量;

$S_1$ : 主影像获取时传感器位置

$S_2$ : 从影像获取时传感器位置,

$B$ : 空间基线长度,  $\alpha$ : 空间基线与水平方向的夹角,

$\theta$ : 主影像入射角,  $\gamma$ : 主影像入射角的变化值,

$H$ : 主影像获取时卫星到地面的相对高度,

$R_1$ : 主影像传感器与目标点之间的距离,

$R_2$ : 从影像传感器与目标点之间的距离,

$P$ : 高程为 $h$ 的目标点,  $P_0$ 是 $P$ 附近地面一参考点, $P'$ 是 $P$ 形变之后的位置点

### C.1.2 技术特点

与其他测量技术的对比, 合成孔径雷达形变测量技术有以下特点:

——非接触式测量。InSAR 在形变监测过程中可无需接近目标, 危险系数较低;

——具有“三高”的监测特点,即“高精度、高分辨率、高频率”。雷达发射主动微波信号, 在夜晚、大雾、云和雨等条件下也能对目标进行形变监测, 具备长时间连续工作的能力;

——高精度和全覆盖形变监测, 每幅星载 SAR 数据的覆盖范围可达数百至上千平方公里。

## C.2 SAR 数据获取

### C.2.1 SAR 数据选择

星载SAR传感器的基本参数参见附录A, 选择进行数据处理的SAR影像应满足:

- a) SAR 数据选取的时间和空间范围, 应略大于任务要求的时间与空间范围;
- b) SAR 数据成像模式、极化方式和视角均应相同;
- c) 宜依据 SAR 数据的临界空间基线选择其空间基线阈值。系统带宽小于 30MHz
- d) SAR 数据选择其一半临界空间基线值作为空间基线阈值。系统带宽大于 30MHz
- e) SAR 数据选择其十分之一临界空间基线值作为空间基线阈值。具体临界空间基线值见附录 A;
- f) 时间基线不宜超过 3 年;
- g) 影像长度的重叠度; 跨轨数据, 相邻两景影像间应有超过 15%影像幅宽的重叠度;

- h) 顺轨方向订购同一时刻超过两景 SAR 数据时, 宜选择订购长条带数据;
- i) 生成优于 10mm 监测精度地面沉降成果, SAR 数据量应大于或等于 8 景/年; 如需生成非线性地面沉降成果, 数据量应大于或等于 16 景/年;
- j) 以 1:100 000 比例尺图件表达 InSAR 形变成果宜采用像元大小为 5m~10m 的 SAR 数据; 以 1:250 000 比例尺图件表达 InSAR 形变成果宜采用像元大小为 15m~30m 的 SAR 数据;

### C.2.2 辅助数据选择

进行数据处理前, 应选择适当的辅助数据, 具体选择内容如下:

- a) 地形数据应满足:
  - 1) 地形数据宜选择分辨率优于 SAR 影像分辨率的数据; 平原地区亦可采用 SRTM DEM 等中低分辨率数据;
  - 2) 地形数据在空间上应保持一致, 无跳变和空洞。如发生质量问题, 面积不超过 20%时, 宜用其它数据补充; 超过 20%时, 宜更换数据;
  - 3) 监测区域地形差大于 100m, 且山区面积超过工区总面积的 10%时, 应采用地形数据产品。选用 DEM 的比例尺不应低于 InSAR 形变成果比例尺。
- b) 成果底图数据应满足:
  - 1) 地面沉降速率图宜选用 SAR 幅度影像作为中等比例尺成果底图, 以不小于 1:100000 比例尺表达成果时宜选用高分辨率的光学遥感影像作为底图;
  - 2) 地面沉降等值线图宜选用地质图作为底图;
  - 3) 光学影像数据宜选用云层覆盖量小于 20%、数据缺失不超过 5%、且色调一致的数据;
  - 4) 卫星轨道数据应满足: 轨道数据宜优先使用精密轨道数据。
- c) 其他数据应满足:
  - 1) 宜采用优于三等的水准数据修正 InSAR 形变成果的基准面;
  - 2) 宜优先选用一、二、三等水准数据作为 InSAR 成果精度的验证数据, 其它验证数据应具有精度等级说明, 检验数据应比 InSAR 成果具有更高的精度等级;
  - 3) 精度验证数据应与 InSAR 形变成果在时空上一致、且在空间上分布均匀。

## C.3 数据处理

### C.3.1 参考点选取原则

参考点稳定且易长期保存, 可通过布设 CR 等作为解算基准点。

参考点具有较高的后向散射特性，SAR 影像强度相对周边明显较高，振幅离差明显较小，应尽量避免湖泊、山区、电线塔等易干扰信号的位置。

### C.3.2 PS-InSAR 数据处理

#### C.3.2.1 数据预处理

数据预处理应满足：

- a) 主影像选择。PS-InSAR 方法宜选择单一主影像。满足空间基线和时间基线要求的前提下，SAR 主影像的选择和像对组合工作步骤如下：
  - 1) 计算所有影像像对间的时间和空间基线，生成时间和空间基线分布图；
  - 2) 选择时间和空间基线居中的一景作为主影像。
- b) 影像配准、裁剪和组合。所有 SAR 影像的对主影像进行配准、裁剪，并组合生成时间序列干涉图集。具体工作步骤如下：
  - 1) 所有影像对主影像进行配准；
  - 2) 将所有数据裁剪成范围一致的区域；
  - 3) 对所有已配准的干涉像对，按照时间序列分别与主影像进行像对组合。逐像元计算干涉相位，生成时间序列干涉图集。
- c) DEM 与主影像配准和裁剪。将 DEM 与主影像进行配准，并将 DEM 范围裁剪成与主影像一致。
- d) 干涉图相位计算。将所有主、辅影像前置滤波，计算干涉相位，生成干涉图。具体工作步骤
- e) PS 点目标选取。对时间序列干涉图集的像元进行 PS 点目标筛选。具体步骤为：
  - 1) PS 点目标识别。SAR 数据 PS 点目标的识别宜采用幅度离散指数法、信噪比法等方法。结合监测区地物类型，宜选择一种或多种方法，以提高 PS 点目标识别的准确性。
  - 2) PS 点目标干涉相位序列生成。将满足上述条件要求的点目标从干涉图集中提取出来，生成 PS 点目标的干涉相位序列。

#### C.3.2.2 差分干涉计算

计算步骤如下：

- a) 平地和空间相位去除。对由 PS 点目标组成的干涉图，进行平地和地形相位的去除。

- b) 空间基线改进。目视检查每景差分干涉图，若含有残余干涉条纹超过半个波长，计算空间基线残余相位，并去除。具体步骤如下：
- 1) 利用二次曲面模型对差分干涉图进行空间基线粗估计，得到空间基线的粗估计相位；再利用差分干涉图中差分相位减去粗估计相位，得到残余相位。
  - 2) 利用 FFT 变换对残余相位进行估计，得到残余基线相位。
  - 3) 将步骤 1) 中空间基线粗估计相位加上步骤 2) 中的残余基线相位，得到改进的空间基线相位。
  - 4) 利用改进的空间基线相位，对平地相位去除残余平地相位，计算得到改进后的平地相位和干涉图集。

#### C.3.2.3 时间/空间域形变估算

对干涉图的差分干涉相位应进行时间和空间域的线性形变相位估计，如有要求，还应进行非线性形变相位估计，去除大气、噪声等残余相位，得到每个点目标的时间序列形变相位。PS-InSAR的计算步骤为：

- a) 相邻点间参数估计。将 PS 点目标相连接构成 DTIN（或称冗余网），依据点间连接关系求相邻点差分相位之差。
- b) 线性形变相位和残余高程相位计算。依据空间基线、时间基线关系，建立 PS 点目标的二维周期图，以此为目标函数使模型相关系数最大化，估算相邻点间的线性形变速率和高程差值。若监测工作设计书仅要求线性形变成果，则可直接输出成果垂直向形变量计算，生成地面沉降速率图。
- c) 非线性形变相位和大气相位计算。从差分干涉相位中去除 2) 中两项相位量，得到残余相位。对该残余相位进行空间域均值滤波，计算得到主影像大气相位。对去除主影像大气相位的残余相位进行空间域低通滤波和时间域高通滤波，得到非线性形变相位。
- d) 时间序列形变相位计算。将 2) 步骤中线性形变相位和 3) 中非线性形变相位相加，结合时间基线参数，得到每个 PS 点目标的时间序列形变相位。

#### C.3.2.4 形变量计算

将PS点目标的形变相位转换成为LOS形变量和垂直向形变量，进行基准纠正和地理编码，生成地面沉降速率图。

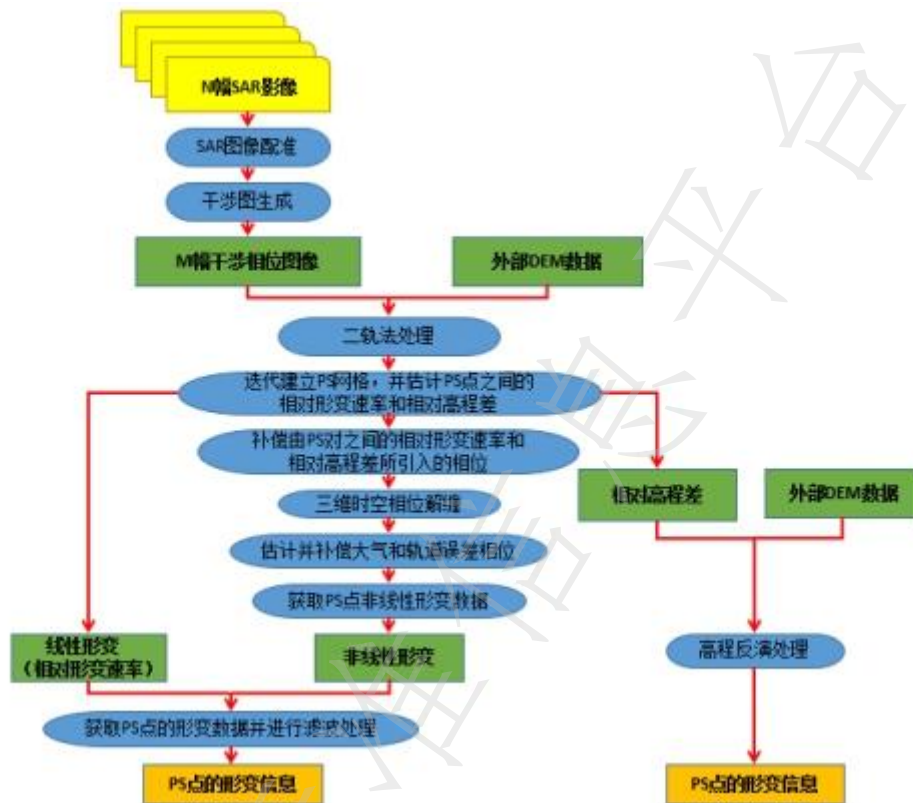


图 C.2 数据处理步骤

### C.3.3 CR-InSAR 辅助监测

针对形变尺度较大、植被茂密等低相干甚至失相干研究区域的地表形变监测研究（道路边坡、地震、滑坡、地裂缝等），采用人工角反射器干涉测量技术。

#### a) 角反射器技术要求

角反射器应满足以下要求：

- 1) 角反射器应使用铝质材料，外加镀锌铁皮，相接处采用三角钢和铆钉固定角反射器。
- 2) 角反射器应表面无应力、平整度好、反射性强。
- 3) 角反射器各边边长、相邻反射面之间的夹角应满足设计要求，边长误差不超过 1cm，角度误差不差过 1°。

角反射器是利用偶镜原理，将三个相互垂直的反射面装在一起，三个反射面做成的角反射器有三条公共的棱边，相当于三个棱镜，因此雷达波无论从哪个角度照射到它的面上都会沿着原来的方向反射回去。由于角反射器具有空间定向反射特性，入射的雷达波经过理想角反射器的三个反射面相继反射后，仍以入射方向严格平行的返回。角反射器的设计有着较严格的技术要求。由于卫星雷达所发射的电磁波

是微波，所以实际使用的角反射器是采用平整的金属板制成的。角反射器的尺寸设计与雷达波的波长和频率有关，波长越长要求其棱越大。

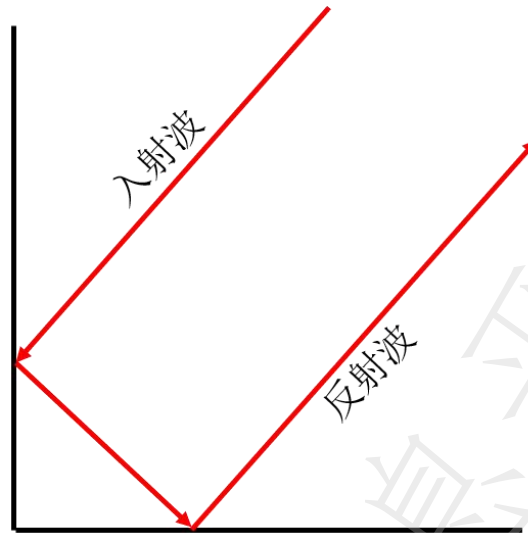


图 C.3 角反射器工作原理示意图

常规的InSAR用角反射器为三面角角反射器。这种角反射器的方向性十分明显，当雷达波入射方向与角反射器的法线方向平行时，角反射器散射截面为最大。这里，角反射器的法线方向是指从角反射器顶点到开口面的中心之间的连线。三面角角反射器的RCS的计算公式为：

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi l^4}{3\lambda^2}$$

式中， $l$ 表示角反射器每一个面棱边的边长， $\lambda$ 是雷达波波长。从公式知道，最大雷达截面与雷达波长成反比，与角反射器尺寸成正比。也就是说，雷达波频率越高，角反射器尺寸越大，散射截面越大。

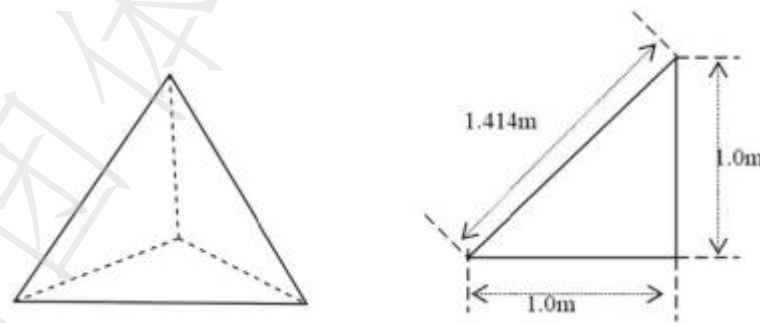


图 C.4 雷达角反射器设计简图

#### b) 角反射器制作

- 1) 一般根据项目需求，综合材料方面的散射效率的考虑，一般选择角反射器直角边长为 1m 铝质材料，因为铝具有很高的介电系数，厚度为 3mm，边侧加 2cm 折边增加强度，同时外加镀锌铁皮（1mm 厚）以保护反射面（铝板），相接处采用三角钢和铆钉固定角反射器，埋设于水泥墩，既起稳定作用，也起定位作用。

- 2) 由于季节变化和天气影响,再加上角反射器的结构特征,很有可能造成其反射区域内堆积雨水或杂物,从而使角反射器的雷达截面积减小,反射面的反射器强度降低,因此我们对角反射器的顶点处预留了三个钻孔(需避开像元中心),可以使雨水、杂物自动流出。



图 C.5 雷达角反射器实物图(安装于松子坑水库大坝)

委托工厂根据设计的图纸对角反射器进行制作,我们需要在制作过程中和制作完成后对人工角反射器进行质量检查。检查的主要内容是角反射器各边边长、相邻反射面之间的夹角是否满足设计要求,对于检查不合格的角反射器,要求进行重新制作。仪器的制作存在一定的误差,我们认为边长误差不超过 1cm,角度误差不差过  $1^\circ$  就满足实验的要求。

#### c) 角反射器布设与安装

##### 1) CR-InSAR 选点

——角反射器布设位置应选择监测区域内背景反射强度较小的区域,需固定在稳定且长期受保护的区域,保证基座稳定。

——安装点应位于有植被覆盖并远离背景强反射体的地方,呈“十”字形或者“井”字形布设,滑坡(边坡)中轴线至少布设 3 个以上 CR 点,距离滑坡体不大于 1km 的稳定区至少布设 2 个 CR 点,尽量使角反射器的强反射能突出的显示在图像上。

——CR 点应选在具有变形代表性的区域,应固定在地表,基座用水泥浇筑。

——角反射器的安装应考虑到卫星过境时的实际轨道及照射方向。

##### 2) CR 安装环境

——CR 点位应远离大功率无线电发射源和高压输电线，距离分别不小于 200m 和 100m，对于多路径散射物体，一般远于 100m。

——CR 点位附近不应有强烈干扰卫星信号的物体，并应远离镜面建筑物，正对的坡面强反射体。

角反射器的安装参数主要为水平朝向( $\theta$ ),俯仰角调节高度(H)。水平朝向参数 $\theta$  (单位:度), 由卫星的航向角决定, 俯仰角调节参数H (单位:米), 由卫星影像的入射角 $\Psi$  (单位:度) 和角反射器的直角边L (单位:米) 共同决定。

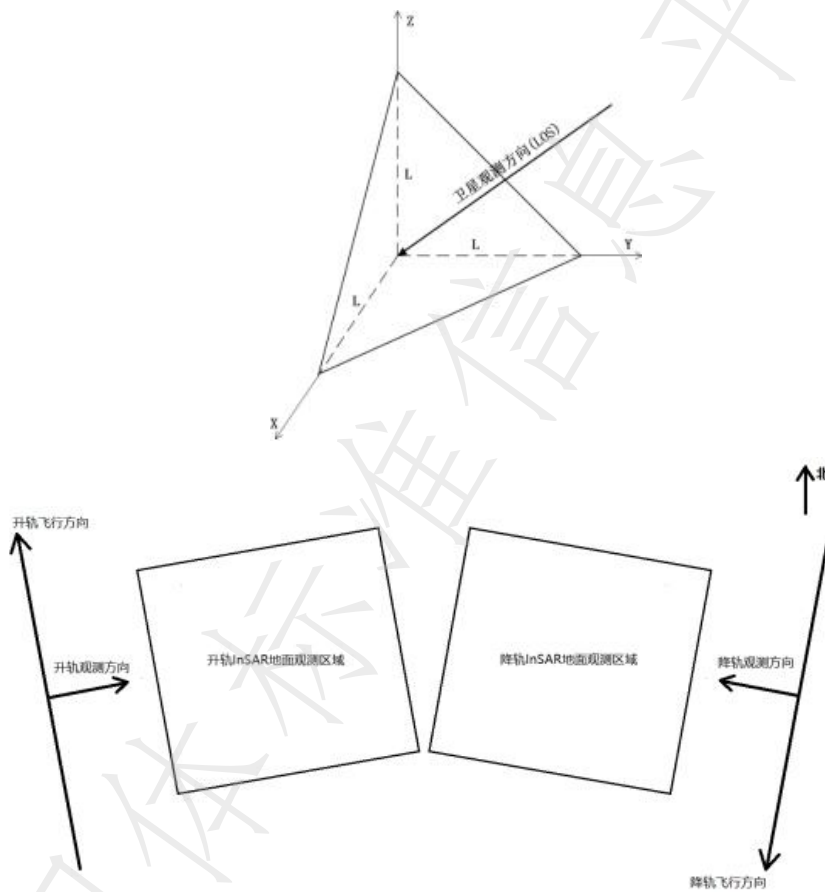


图 C.6 角反射器朝向参与卫星的关系

在安装角反射器时, 其俯仰角 $\alpha$ 可通过其与安装水平面的垂直距离H来调整俯仰角度 (如角反射器侧视图所示)。参数H由影像入射角 $\Psi$ 和角反射器直角边长度L共同决定:

$\alpha$ 和H的计算公式如下:

$$\alpha = \arctan(\sqrt{2}) - \psi$$

$$H = \frac{\sqrt{2}}{2} L \cdot \sin \alpha$$

d) 角反射器识别与解算

影响InSAR监测结果主要限制因素包括：

- 在重复观测期间，地表覆盖的变化造成的时间去相干；
- 在重复观测期间，由于大气状况的不同而引起的相位变化。

监测区域内应存在足够数量的PS点，这些PS点在重复观测期间内，其雷达反射截面积(RCS)基本上不发生变化即保持了很高的相干性。

#### C.4 数据处理成果要求

##### C.4.1 精度评估及要求

- a) 在相干目标稀少的地区，宜通过空间插值相干目标点拟合成面，提取水准点位置对应的相干目标拟合成面的位置，分别提取水准和相干目标的沉降值，组成一组精度验证数据，收集齐工作区所有验证数据组后，进行精度验证和相关性分析。
- b) 空间插值方法宜采用克里金插值法。
- c) 在相干目标密集的地区，宜采用最邻近点法搜索水准点数据附近最邻近相干目标点，组成验证数据组，进行精度验证和相关性分析，其搜索应在 5 个像元以内。
- d) 检验 InSAR 监测成果精度的样本数目应大于等于 15 组。如果地面实测验证数据数量不符合要求，应及时补充数据。相关系数要求相干系数大于 0.7 时，评估结论为：InSAR 成果精度可靠，数据可信。相干系数小于 0. 时，宜重新选择方法，检查数据处理质量，评估结论为：InSAR 成果不可靠。中误差要求 InSAR 监测成果的中误差值应满足附录 B 中的成果精度要求。如不符合要求，应调整所选择的方法，检查数据处理质量，再次进行数据处理。

##### C.4.2 阶段成果整理

在开展InSAR数据处理前，应检查 SAR 原始影像质量和数量及辅助数据的种类、质量、精度、数量。具体内容如下：

- a) SAR 数据要求应满足：
  - 1) 数据质量应符合设计书中要求；
  - 2) 检查数据幅度影像图是否保持一致、完整，无跳变。如出现上述质量问题，应补充或更换数据；
  - 3) 检查重轨数据有无数量缺失，所有数据的公共区域是否完全覆盖工作区。如不符合条件，应及时补充数据。

- b) 辅助数据要求应满足：
- 1) 检查地形数据的完整性和一致性。如有数据空洞可用其它数据填补空洞；
  - 2) 检查光学遥感光学影像数据的云层覆盖量、数据缺失和色调一致情况；
  - 3) 确认轨道数据的精度；
  - 4) 确认水准数据的精度等级是否符合设计书要求。如不符合要求，则不予采用，或补充满足精度要求的数据；
  - 5) 检查水准数据是否与被检验的 InSAR 成果具有时空一致性，空间分布是否较均匀。如不符合要求，需补充数据。
- c) 数据处理完成阶段，应检查阶段成果和工作日志。具体内容包括：
- 1) 检查数据处理作业流程是否符合设计书要求，每个工作步骤的日志是否齐全，如有缺失，应尽快补充；
  - 2) 检查数据处理阶段性成果是否齐全，关键指标是否符合技术要求。精度评估阶段，应检查精度评估结果是否符合任务要求，成果精度结论是否适当，报告是否内容完整。
- d) 成果资料整理阶段，应检查成果图、表格和报告的内容、数量和质量。具体内容为：
- 1) 检查成果图件的图件类型、比例尺和大地坐标系是否正确，文件名命名是否正确，图面要素是否完全、规范，图面内容是否清晰可辨，矢量线拓扑关系是否正确等。如不符合要求，应补充内容或修改错误；
  - 2) 地面沉降统计表格字段是否完整，取值范围、数据类型是否符合要求等；
  - 3) 检查成果报告内容是否齐全。

#### C.4.3 成果提交及检查

InSAR地面沉降监测数据和文件是地面沉降数据库的重要组成部分，其内容应包括：

- a) 文字报告:InSAR 监测工作设计书和地面沉降 InSAR 监测报告。
- b) 数据: SAR 原始数据，地形数据，光学遥感影像，轨道数据，水准数据或 GPS 数据，其中除 SAR 原始数据外，其它数据均视项目实际需要所配备的可选数据。
- c) 图件分为两类主要成果：
  - 1) 阶段成果图包括：差分干涉相位图、相干图和解缠相位图等；
  - 2) 最终成果图包括：地面沉降速率图、地面沉降累计沉降量图、地面沉降等值线图 and 地面沉降时间序列图等，其中除地面沉降速率图是必须汇交成果图外，其它成果图均可选择制作成果图件。
- d) 统计报表。沉降中心沉降量统计表和沉降面积统计表，统计报表均为可选择制作报表。