



T/CECS G XXXX: 202X

中国工程建设标准化协会标准

公路滑坡遥感监测技术规程

Technical Specification for Landslide Monitoring on Highway

(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

(空白)

征求意见稿

中国工程建设标准化协会标准

公路滑坡遥感监测技术规程

Technical Specification for Landslide Monitoring on Highway

T/CECS G: 编号

主编单位：中交第二公路勘察设计研究院有限公司

批准部门：中国工程建设标准化协会

实施日期：202X年XX月XX日

××××××出版社

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2019 年第一批中国工程建设标准化协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》（建标协字[2019]84 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定《公路滑坡遥感监测技术规程》（以下简称“本规程”）。

本规程分为 7 章、3 篇附录，主要内容包括总则、术语、一般规定、高分辨率卫星图像遥感监测、合成孔径雷达遥感监测、无人机摄影测量遥感监测、激光雷达遥感监测和附录 A 主要高分辨率卫星图像参数、附录 B 滑坡遥感解译标志、附录 C 主要雷达卫星图像参数。

本规程由张霄负责起草第一章，明洋负责起草第二章，韩飞、熊忠招、吴银亮、刘亚萍、邹世峰负责起草第三章，张霄、闫海涛、唐钰涵、钟成负责起草第四章，闫海涛、钟成、夏旺负责起草第五章，费亮、刘江瑜、张行、赵胜强、汤阳城、李圣明负责起草第六章，张霄、余飞、曾聪、唐钰涵负责起草第七章，张霄负责起草附录 A，钟成负责起草附录 B，闫海涛负责起草附录 C。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，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，由中交第二公路勘察设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，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），或张霄（地址：武汉市经济技术开发区创业路 18 号，邮编：430056；电话：84214300；电子邮箱：37406103@qq.com），以便修订时研用。

主 编 单 位：中交第二公路勘察设计研究院有限公司

参 编 单 位：中铁第四勘察设计院集团有限公司

湖北省国土测绘院

中国地质大学（武汉）

主 编：张霄

主要参编人员: 韩飞 明洋 吴银亮 熊忠招 钟成 赵胜强 闫海涛 曹建华 费亮 李圣明 余飞 刘江瑜 邹世峰 刘亚萍 曾聪 唐钰涵 张行 汤阳城 夏旺

主 审: 胡珊

参与审查人员: 官善友 鹿罡 王云安 张建 董秀军 史俊波 ×× ×××

参 加 单 位: ××××××

参 加 人 员: 周坤 张兵 ×××

征求意见稿

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	5
4 高分辨率卫星图像遥感监测	8
4.1 一般规定	8
4.2 数据选择	8
4.3 数据处理	9
4.4 遥感解译	10
4.5 成果提交	11
5 合成孔径雷达遥感监测	12
5.1 一般规定	12
5.2 数据选择	12
5.3 数据处理	13
5.4 数据分析	14
5.5 成果提交	14
6 无人机摄影测量监测	16
6.1 一般规定	16
6.2 数据采集	16
6.3 数据处理	18
6.4 数据分析	19
6.5 成果提交	20
7 激光雷达遥感监测	21
7.1 一般规定	21
7.2 数据采集	21
7.3 数据处理	23
7.4 数据分析	24
7.5 成果提交	24
附录 A 主要高分辨率卫星图像参数	26
附录 B 滑坡遥感解译标志	28
附录 C 主要雷达卫星图像参数	29

1 总则

1.0.1 为统一公路滑坡遥感监测技术标准，推动公路滑坡遥感监测技术应用和发展，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各等级公路运营过程中的滑坡遥感监测。

1.0.3 公路滑坡遥感监测应积极审慎使用新技术、新方法和新设备。

1.0.4 公路滑坡遥感监测除应符合本规程的规定外，尚应符合有关法律法规及国家、行业现行有关标准的规定。

征求意见稿

2 术语

2.0.1 遥感 remote sensing

不接触物体本身，用传感器收集目标物的电磁波信息，经处理、分析后，识别目标物，揭示其几何、物理性质和相互关系及其变化规律的科学技术。

2.0.2 数学基础 mathematic base

为控制地图地理要素分布位置和几何精度，由一定数学法则构成的基础，包括大地基准、高程基准、地图投影、比例尺等。

2.0.3 元数据 metadata

关于地理空间数据的数据，即数据的标识、覆盖范围、质量、空间和时间模式、空间参照系和分发等信息。

2.0.4 空间分辨率 spatial resolution

遥感图像像元对应的地面范围，一般以其长度或宽度表示。

2.0.5 时间分辨率 temporal resolution

覆盖同一区域的相邻两次遥感图像的采集时间间隔。

2.0.6 时相 time

遥感传感器获取数据的时间。

2.0.7 光学遥感 optical remote sensing

指传感器工作波段介于 $0.38\mu\text{m}$ ~ $15\mu\text{m}$ 之间的遥感技术，含可见光、近红外、中波红外、热红外等波段范围。

2.0.8 激光雷达扫描 light detection and ranging technique (LiDAR)

发射激光束并接收物体回波信号从而获取目标三维坐标信息的技术。

2.0.9 合成孔径雷达 synthetic aperture radar (SAR)

以多普勒频移理论和雷达相干为基础,综合处理雷达回波振幅和相位数据的遥感系统。

2.0.10 干涉合成孔径雷达 interferometric synthetic aperture radar (InSAR)

对合成孔径雷达在不同空间位置获取同一地区单次或多次观测数据的相位差等信息进行分析处理,获取三维地形信息的技术。

2.0.11 差分干涉合成孔径雷达 differential interferometric synthetic aperture radar (D-InSAR)

从两次及以上 SAR 数据的干涉相位中去除地形相位,提取地表几何形变信息的技术。

2.0.12 永久散射体 permanent scatterer

在长时间跨度 InSAR 图像序列中稳定的天然反射体。

2.0.13 永久散射体干涉合成孔径雷达 PS-InSAR

对长时间序列 SAR 图像集中的永久散射体进行时间和空间域变形量计算,以提取高精度时序变形信息的干涉测量方法。

2.0.14 短基线集干涉合成孔径雷达 SBAS-InSAR

利用时间和空间基线均小于给定阈值的干涉像对构成多个差分干涉图集,对相干像元的差分相位序列进行时序分析,以获取相干像元变形量时序的干涉测量方法。

2.0.15 点目标 point target

SAR 图像中具有稳定、后向散射特性强的像元。

2.0.16 角反射器 corner reflector (CR)

能将雷达入射信号沿原路径反射回去,并在 SAR 图像上形成高强度信号的人

工反射装置。

2.0.17 空间基线 spatial baseline

同一地区两景 SAR 图像上同名点在卫星轨道上的连线。

2.0.18 时间基线 temporal baseline

同一地区两景重复轨道 SAR 图像的时差。

2.0.19 单视复图像 single look complex (SLC)

像素以复数形式同时表达地表雷达波后向散射强度和雷达斜距有关的相位值，且方位向和距离向视数均为 1 的原始 SAR 影像。

2.0.20 干涉图 interferogram

干涉测量中，配准后的两景合成孔径雷达图像对应像素值进行复共轭相乘得到的复图像。

2.0.21 影像特征 image feature

影像的几何形态、大小、图案、色彩或色调、纹理、阴影、位置和布局等。

2.0.22 滑坡遥感解译 landslide remote sensing Interpretation

利用遥感图像的形态、色调、纹理以及阴影等特征来判译滑坡的位置、类型、边界、规模、状态，及其形成条件和影响因素的技术。

2.0.23 解译标志 interpretation mark

光学遥感图像中可以用来区分相邻物体或确定物体属性的波谱特征和空间特征。

2.0.24 点云数据 point cloud data

以离散、不规则方式分布在三维空间中的点的集合。

3 基本规定

3.0.1 开展公路滑坡遥感监测前，应对公路沿线滑坡相关资料进行收集与分析，并包含下列内容：

- 1 应收集滑坡编目、遥感影像和公路建设工程资料，以及地形地貌、气象水文、地质构造、地层岩性、土地利用等地质环境数据。
- 2 应分析各种基础数据的覆盖范围、生产时间、数据精度、坐标系统、可使用程度。

3.0.2 开展公路滑坡遥感监测前应制定工作方案，宜包含下列内容：

- 1 公路遥感监测的目的、意义、范围、主要监测内容及预计工作量；
- 2 监测区地形地貌、地质环境条件、水文概况及以往工作程度；
- 3 执行的主要技术标准和技术要求；
- 4 主要技术流程和作业方法；
- 5 进度计划与任务分工；
- 6 成果的质量检查与控制措施；
- 7 预期提交的成果。

条文说明

制定监测方案是保证监测工作合理开展、顺利实施的重要环节。通过监测方案的编制，可加深对监测现场情况了解，深化对前期资料的认识，同时还可深入分析监测对象性质、特征、机理和发展趋势，明确监测工作重点，完善监测措施。监测方案的制定既要保证对边坡的科学有效合理施测，又要防止监测设备的无效堆砌，造成不必要的浪费。

公路滑坡遥感监测工作涉及广泛的地质工程、遥感设备等相关知识，具有很高的专业性。监测工作从业人员应具有一定的专业知识和工程实践经验。

3.0.3 公路滑坡遥感监测坐标系统的选择应符合下列规定：

- 1 平面坐标系统应采用 2000 国家大地坐标系；
- 2 高程系统应采用 1985 国家高程基准。对竖向精度要求高的差分干涉测量（InSAR）、全球导航卫星系统（GNSS）监测可直接采用大地高；
- 3 宜采用 3° 分带，跨带时应以面积较大的区域为基准进行换带处理，统

一到一个分带之中；

4 同一监测区采用不同的遥感监测方法宜统一数学基础。

3.0.4 公路滑坡遥感监测应布设基础控制网，并符合下列规定：

1 基准点应设置在远离工程施工影响范围之外，或致灾体变形影响范围之外的稳定岩土体上，每个测区的基准点宜不少于 3 个。

2 监测点布设应根据监测等级、监测内容和方法要求，结合监测范围内地形地貌、地质条件复杂程度、灾害形成机制、通视和施工安装等条件，选择能反映致灾体变化特征、发展趋势的关键点及代表性部位合理布设。

3 测线间距宜结合滑坡规模确定监测标靶数量与间距布设。每条测线测点数量宜不少于 3 点，标靶点间距宜小于 60m。横向测线应根据致灾体性质，选择滑体后缘、中部和前缘部位布设。对地质条件复杂、规模较大、威胁性较大的致灾体，监测点应在平面加密布设。

4 监测网点的设置应考虑交通便利性和工作安全性。

5 控制网布设应符合全球定位系统(GNSS)测量规范(GB/T 18314)中第 6 节的规定。

条文说明

基准点应布设在地基稳固、便于监测和不受影响的地点。监测点根据需要设置，应与基准点构成合理的网形。在通视条件良好的情况下，可在基准点上直接测定监测点。

控制网布设应合理、高效、经济。网型的布置应根据滑坡的机理、规模、形状、变形特征、地形地质条件、地形地貌特征及视通条件等综合确定。监测点尽量选择在变形总量及变形变化较大、受力较为集中、受外界影响因素较大的部位布设，如着重考虑滑坡后缘推移或被牵引段、主滑动段、前缘抗滑或被挤压段、前缘牵引段；易产生变形部位（剪出口、裂缝、临空面等）、开裂或隆起处。

3.0.5 公路滑坡遥感监测应包括下列内容：

1 公路周边地形地貌、土地利用等地质环境要素变化；

2 滑坡灾害点位置、边界、类型、形态、状态、运动规律、分布及规模等信息；

3 滑坡变形前出现的地表裂缝和前缘岩土体局部坍塌、鼓胀等宏观前兆，建筑物或地面的破坏等变形量及其变形速率；

4 滑坡表面的三维位移量、位移方向与位移速率，及裂缝、崩滑面（带）两侧的相对位移量。

3.0.6 公路滑坡监测方法、监测频率、精度等宜按表 3.0.6 选择：

表3.0.6 公路滑坡遥感监测方法

监测方法	空间分辨率	适用范围	监测周期	监测频率	监测精度
高分辨率卫星图像遥感监测	优于1m	区域性滑坡识别和宏观变化监测	长期	大于1次/月	优于2m
合成孔径雷达遥感监测	优于20m	区域性滑坡变形监测	长期	大于1次/月	优于1cm
无人机摄影测量遥感监测	优于10cm	地形复杂区域的小范围、高精度监测	短期	大于1次/天	优于10cm
激光雷达遥感监测	优于16pt/m ²	植被覆盖度高、地形复杂区域的小范围、高精度监测	短期	大于1次/天	优于10cm

条文说明

光学遥感图像更符合人类视觉感知特性，更有利于对地面目标的人工辨认、分析和解译。但光学遥感属被动遥感，图像受大气状况影响很大，在云雨天气及夜间难以成像。合成孔径雷达（SAR）作为一种微波传感器，具有不受云雨天气的影响且不依赖太阳光，可全天时、全天候监测等优点，能够对光学遥感解译起到补充作用；激光雷达点云可以快速获取地表三维模型，且具有较强的穿透性，可以捕捉树林下的地表形态。无人机因飞行方便，适合小范围、紧急条件下的遥感图像获取。

3.0.7 公路滑坡遥感监测宜采用多种遥感监测方法进行对比分析。

3.0.8 公路滑坡遥感监测工作结束后，应提交监测报告，宜包含下列内容：

- 1 遥感监测的工作概况，监测区工作范围，以往工作成果；
- 2 地形地貌条件与地质环境条件，监测对象现状和特征；
- 3 技术标准和技术要求；

- 4 技术流程和作业方法;
- 5 质量检查与验证情况;
- 6 遥感监测成果的综合分析与发展趋势;
- 7 公路滑坡防治措施建议和意见。

4 高分辨率卫星图像遥感监测

4.1 一般规定

4.1.1 高分辨率卫星图像遥感监测宜用于区域性滑坡识别、宏观变化监测和地质环境变化监测,宜参考附录 A 选择合适的高分辨率卫星图像数据。

条文说明:

滑坡区域的地形、地貌、岩性、地质构造、地下水发育等是滑坡形成和发育条件。滑坡体发育的范围、总体滑动方向、规模,滑坡与路线或构造物的关系及影响程度等可用于评估滑坡的潜在危害程度。

4.1.2 应结合工作区的区域地形、地质特点,详细研究各种资料,选择公路滑坡有代表性的影像特征,宜按本规程附录 B 建立解译标志,并在解译中不断补充、完善解译标志。

4.1.3 宜结合孕灾地质背景资料,采用二维与三维相结合的方式,在原始分辨率影像上人机交互进行滑坡遥感解译。采用机器学习方法解译时,应对其成果进行目视核查。

4.2 数据选择

4.2.1 遥感图像不应出现周期性条纹、亮线、斑点及周期性像素偏移、错行或部分行、列数据缺失状况。

4.2.2 遥感图像的云、雪覆盖应少于 5%,且不能覆盖重要地物。

4.2.3 相邻两景卫星遥感图像重叠度不宜小于图像宽度的 4%。

4.2.4 卫星遥感图像侧视角山区不宜大于 16° ，平原地区不宜大于 20° 。

4.2.5 组成立体像对的两景遥感图像宜为相同传感器采集。

4.3 数据处理

4.3.1 应对遥感图像进行辐射定标、大气校正、太阳高度角校正和地形校正等辐射校正处理。

4.3.2 应选择波段间相关性小、标准偏差大、能突出监测目标信息的波段图像进行波段合成。

4.3.3 应对不同波段或不同传感器遥感图像进行配准处理。配准误差应小于 $1/2$ 个像元，山地可放宽至 1 个像元。

4.3.4 遥感图像宜采用物理模型或有理函数模型进行正射校正处理，丘陵地可采用三次多项式模型进行几何校正处理。校正误差应小于 $1/2$ 个像元，山地可放宽至 1 个像元。

4.3.5 宜对全色图像和多光谱图像进行图像融合处理，两种图像的空间分辨率差距应小于 4 倍。

4.3.6 宜依据任务需要对相邻两景遥感图像进行数字镶嵌处理。镶嵌后的遥感图像应灰度、色调协调，不应出现漏洞、不应有明显的镶嵌痕迹。

4.3.7 数字正射影像（DOM）和数字高程模型（DEM）处理应满足《公路勘测规范》（JTG/T C10）相关要求。

4.4 遥感解译

4.4.1 公路滑坡遥感解译应包括下列内容：

- 1 应解译滑坡的类型、形态、范围和规模；
- 2 宜量测滑坡体的体积、相对高度和坡度；
- 3 宜统计分析滑坡的类型、规模、分布及地面密度；
- 4 应判断滑坡的总体滑动方向，推断其稳定性和可能的成灾范围；
- 5 应解译滑坡后壁、侧壁、滑坡舌、滑坡台、鼓张裂缝等滑坡要素；
- 6 应分析滑坡空间分布特征和规律，推断其孕灾地质背景及主要影响因素；
- 7 应分析滑坡的发育特征，评价其稳定性和危险性，分析滑坡对公路工程的危害。

4.4.2 应利用多时相光学遥感影像进行多期滑坡遥感解译，估算灾害体滑移体积和规模，推断滑坡的发展趋势、影响范围和危害程度，划定滑坡灾害危险区。

条文说明

利用多时相遥感图像进行多期地质灾害遥感解译，通过对比分析影像特征是否发生变化，可有效识别地质灾害隐患点和突发地质灾害，并可推断地质灾害的稳定性、危险性、发展趋势和危害程度等。

4.4.3 应采用多时相遥感影像分析土地利用、地形、植被等环境要素变化对公路地质安全和滑坡活动性的影响。

4.4.4 应对滑坡遥感解译结果进行实地验证，并应根据验证结果对遥感解译成果进行修正。

条文说明

应采用点、线、面相结合的方法进行验证。对于解译效果好的地段以点验证为主；对于解译效果中等的地段应布置一定代表性路线追索验证；对于解译效果差的地段以面验证为主。野外验证图斑数量不小于解译图斑总量的 10%，有疑问的图斑应进行 100%野外验证。

根据验证后的解译标志进行地质灾害及孕灾地质背景的详细解译，修改初步

解译成果，对遗漏的地质灾害进行补充，使解译成果完整、客观、全面、准确地反应调查区内的地质灾害状况。对调查中存在的不足或遗漏的问题，应及时安排野外补充工作或现场解译验证。

4.5 成果提交

4.5.1 高分辨率卫星图像滑坡遥感监测应提交监测报告、数据成果及专题图件等成果。

4.5.2 公路滑坡遥感监测报告宜包括下列内容：

- 1 监测的主要内容；
- 2 任务依据与工作量；
- 3 采用的遥感图像类型及数据处理方法；
- 4 遥感解译方法；
- 5 遥感监测结果；
- 6 质量检查与验收情况。

4.5.3 数据成果应包括遥感监测获取的滑坡编目、地质环境条件等矢量数据及属性数据。

4.5.4 专题图件应包括多时相滑坡地质环境条件图、滑坡灾害分布图等。

条文说明

在编制好的地理底图的基础上，依次叠覆地貌分区、地层岩性、构造等区域地质环境要素图层，形成区域地质环境遥感调查图。以编制好的地理底图为基础，依次叠覆符号化的地质灾害点类型、分布及规模等，形成地滑坡灾害分布遥感调查图，比例尺视具体调查要求而定。

5 合成孔径雷达遥感监测

5.1 一般规定

5.1.1 合成孔径雷达遥感监测宜用于区域性、高精度滑坡表面变形监测。

条文说明

差分干涉测量（InSAR）监测分为区域滑坡识别和单体变形特征监测。前者包括识别滑坡位置、规模、数量、与背景环境的速度差值和灾害发育程度等，后者包括滑坡范围、变形量、不同部位的变形差异、变形发展过程和发展趋势。差分干涉测量（InSAR）适合监测处于变形发展阶段的滑坡，年变形量毫米至米级。

5.1.2 应依据监测对象的形变特征、区域地质气候条件、重点监测目标，选择合适的合成孔径雷达（SAR）数据和差分干涉测量（InSAR）处理方法。

条文说明

应综合考虑地形、植被、气候、地层岩性、地震和活动构造、人类工程活动，滑坡的类型、时空发育特征、发育阶段和变形梯度等各类地质背景条件，为 InSAR 监测数据选取、处理方法、参数确定和监测数据地质分析提供参考依据。

5.1.3 InSAR 监测结果宜与其它高精度监测数据对比验证以评价其精度。

5.2 数据选择

5.2.1 SAR 数据选取的时间和空间范围，应大于任务要求的时间与空间范围。

5.2.2 应根据监测任务要求和监测对象特点，参考附录 C 选择合适的 SAR 数据类型，并符合表 5.2.2 的要求：

表5.2.2 SAR数据参数及监测对象

监测对象	分辨率（m）	波段	SAR 数据
植被较多区域	20-50	L	JERS-1、ALOS PALSAR、ALOS 2 PALSAR 2
植被较少区域	5-20	C	ERS-1/2、ENVISAT ASAR、RADARSAT -1、RADARSAT -2、Sentinel-1A/B
重点目标	1-5	X	TerraSAR-X/TanDEM-X\COSMO-SkyMed

5.2.3 SAR 数据的成像模式、极化方式和视角应相同。

5.2.4 SAR 图像宜根据系统带宽选择空间基线阈值，并符合表 5.2.4 的要求：

表5.2.4 SAR图像临界空间基线阈值选择表

系统带宽	空间基线阈值
<30MHz	1/2临界空间基线值
>30MHz	1/10临界空间基线值

5.2.5 同轨数据相邻两景影像应有超过 15%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。

5.3 数据处理

5.3.1 应依据可用 SAR 数据量和精度要求，选择合适的 InSAR 处理技术，并符合表 5.3.1 的要求。

表5.3.1 InSAR处理技术要求与适应条件

处理技术	SAR最少数据量（景）	精度要求	适用条件
InSAR	2	<10m	获取监测区DEM
D-InSAR	≤ 4	<3cm	高相干、中短时间基线。适用时间间隔较短，天气变化不大的地区
SBAS-InSAR	≥ 5	<1cm	适用于多种时间基线和相干性情况
PS-InSAR	≥ 16	<5mm	低相干、短时间基线。可用于时间间隔长，天气差异较大的地区
CR-InSAR	≥ 5	<1cm	低相干，需提前布设角反射器

条文说明

目前用于监测的主流 InSAR 技术方法根据载体平台的不同主要分为卫星 InSAR 遥感监测和地基 InSAR (GB-InSAR) 遥感监测。其中，卫星 InSAR 遥感监测根据 InSAR 技术算法的不同，又主要分为 InSAR、D-InSAR、PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 和 CR-InSAR 等技术方法。各技术方法的监测精度，在实际应用中还会受到数据具体覆盖范围以及大气改正等因素影响。

5.3.2 InSAR 数据处理基本流程应包括数据预处理、差分干涉计算、形变量计算等步骤。

5.3.3 应在综合考虑数据质量、时间基线和空间基线等因素的前提下，剔除不连续和存在较大残余相位的干涉图，形成工作区有效干涉图序列。

5.3.4 应对 InSAR 形变图进行必要的滤波、数据压缩及地理编码处理，并根据变形量大小利用彩色色标分级显示。

5.3.5 应选择合适的同名形变点及地面控制点进行多次联合平差，计算各景 InSAR 形变图偏移值，进行多景 InSAR 形变图拼接。

5.3.6 应选择合适的空间插值方法对点目标形变监测结果实施插值处理，获取每个像元的地表形变结果。

5.4 数据分析

5.4.1 应对监测区地表形变进行分析，制作地表形变速率图和累计形变量图，成图比例尺宜为 1:2000~1:10000。

5.4.2 宜对滑坡关键部位进行时空形变分析，制作时空形变曲线图，成图比例尺宜为 1:500~1:2000。

5.4.3 可选用最临近法、区域半径法、区域融合法和形变格局法，对获取的形变信息进行精度分析。InSAR 监测的误差绝对值宜优于 $15\text{mm}/a$ 。

5.5 成果提交

5.5.1 合成孔径雷达滑坡遥感监测应提交监测报告、数据成果及专题图件等成果。

5.5.2 监测报告应包括 InSAR 监测的主要内容、任务依据与工作量，采用的 SAR

图像类型及数据处理方法，InSAR 监测结果，精度检查与分析情况。

条文说明

质量控制应贯穿公路滑坡 InSAR 监测的全过程，包括：InSAR 监测方案的设计审查，数据处理过程文件汇交备查，数据处理结果的精度评估，检测结果野外抽查，InSAR 监测成果评审等环节。

5.5.3 数据成果应包括 SAR 正射影像数据、点目标形变速率数据、点目标累计形变量数据、插值形变速率数据、插值累计形变量数据等。

5.5.4 专题图件应包括点目标形变速率图、点目标累计形变量图、插值形变速率图、插值累计形变量图等。

6 无人机摄影测量监测

6.1 一般规定

6.1.1 无人机摄影测量宜用于高精度、小范围的滑坡体积与塌陷变化的快速监测。

条文说明

滑坡、崩塌、泥石流等突发灾害发生后，需要第一时间搜集灾前、灾后的各种航空、航天遥感图像进行应急遥感监测。公路突发滑坡灾害多发生在多、多雾等恶劣天气情况下，采用低空无人机进行灾害应急遥感监测更具优势。

6.1.2 无人机飞行平台主要技术指标应满足下列要求：

- 1 续航时间不短于 30 分钟；
- 2 任务载荷不轻于 0.5kg；
- 3 抗风能力不小于 6 级。

6.1.3 无人机摄影测量数码相机主要技术指标应满足下列要求：

- 1 单个成像探测器面阵不应少于 4000 万像素；
- 2 镜头应定焦，焦平面应恒定无穷远，镜头与相机机身连接应稳固；
- 3 定位模块应满足 RTK、PPK 或 PPP 等模式要求。

6.2 数据采集

6.2.1 无人机摄影测量数据采集前应进行现场踏勘，宜包含下列内容：

- 1 植被、地形、地貌及天气状况；
- 2 机场、通信、电力等重要设施；
- 3 基础控制点的位置及完好情况。

6.2.2 起降场应尽量选在测区中间海拔较高处，并应符合下列规定：

- 1 起降场地宜相对平坦、通视良好；
- 2 距离军用、民用机场应不小于 10km；
- 3 应远离人口密集区和大规模水面，半径 200m 范围内不能有高压线、重大

建筑物、重要设施等；运营铁路两侧 500m 内不允许飞行无人机。

4 附近应无正在使用的雷达站、微波中继、无限通信等干扰源。

条文说明

起降场地一般为平坦的空地或宽阔的道路面，其周边无高压线及高层建筑，起降方向与当时风向平行，无人员或车辆走动。当测区无起降条件时，则采用手掷起飞或弹射起飞，伞降或拦阻网降落。

6.2.3 航线应依据测区几何形状、地形起伏条件进行规划，并应满足下列规定：

- 1 航线宜平行于各测区图廓线，宜采用“之”字型或“井”字型进行设计；
- 2 宜按照监测精度、影像分辨率、飞行安全的要求设置航高；
- 3 航线旁向重叠度应不小于 30%，在丘陵山地地区，设计时宜加大航线旁向重叠度；
- 4 航线布设应超出监测区域范围 200m-500m；
- 5 在一条航线内，旋翼机飞行速率不应大于 15m/s；航线俯仰角、侧翻角宜不大于 2°，最大不超过 4°；飞机转弯时，坡度宜不大于 15°，最大不超过 22°；
- 6 在同一个监测区、多期监测所布设的航线、航高、飞行速率及飞行姿态应保持一致。

条文说明

航线按照实际需要的地面分辨率进行设计，航线能完整覆盖整个航拍区域。需根据无人机的性能参数如巡航速度、续航时间、有遮挡及无遮挡环境下可控距离以及航摄地区的地形特征等，规划无人机的飞行航线及规定单架次飞行的最大飞行距离以保证无人机的飞行安全。

6.2.4 无人机作业实施应满足下列要求：

- 1 作业前应指定详细的飞行计划，应针对可能出现的紧急情况指定应急预案；
- 2 应在风力小于无人机抗风等级的条件下进行云下摄影；
- 3 进行 PPK 测量计算实际曝光点坐标时，可在就近基础控制点上架设 GNSS 地面基站点。

6.2.5 像控点布设应采用 GNSS 辅助航摄区域网布点方案，并应符合下列规定：

- 1 基站点宜选在监测区域周围地面基础稳定且视野开阔的地方；
- 2 基站点应满足控制测量等相关规范要求；
- 3 同一个监测区、多期监测周期内应使用相同 GNSS 接收机架设在同一个基站点上；
- 4 应将基站点与监测对象同步进行观测；
- 5 像控点的控制网布设应符合全球定位系统(GNSS)测量规范(GB/T 18314)中第 6 节的规定。

条文说明

控制点必须选在影像清晰的明显地物点上，如细田埂的交汇点、十字路口的道路中心线交汇点或其他接近正交的线状地物交点，且尽量选在上下两条航线六片重叠范围内，使布设的控制点能用于多张像片。

6.2.6 无人机摄影测量作业安全保障应符合下列规定：

- 1 开展作业前和作业后应进行仪器检查，合格后方才能组织作业；
- 2 无人机作业应满足《无人机航摄安全作业基本要求》(CH/Z3001)规定；
- 3 作业员人身安全应符合《测绘作业人员安全规范》（CH 1016）的规定。

6.3 数据处理

6.3.1 无人机摄影测量数据预处理应符合下列规定：

- 1 应分离出影像数据、惯导数据（IMU）等原始数据。可对原始数据进行数据格式转换，但不应损失几何信息和辐射信息；
- 2 影像质量较差时，宜进行影像增强处理；
- 3 原始影像数据应进行畸变差改正；
- 4 分块大小应根据航摄分区、软硬件处理能力合理设置；分块接边处宜选择地形起伏较小区域；区域接边处应有控制点分布。

6.3.2 无人机摄影测量空中三角测量应采用半自动交互式作业方式，并符合下列规定：

- 1 连接点中误差应优于 1 个像素，最大残差应优于 3 个像素；

- 2 每个像对连接点应分布均匀，每个标准点位区应有连接点；
 - 3 自动相对定向时，每个像对连接点数目应大于 30 个；
 - 4 基本定向点残差、检查点误差、公共点较差最大限值应按照《数字航空摄影测量空中三角测量规范》（GB/T 23236）执行；
 - 5 应对连接点、像片控制点进行粗差检测、删除或修正。
- 6.3.3 无人机摄影测量质量检查应符合表 6.3.3 的要求：

表 6.3.3 无人机摄影测量质量检查

质量要求	检查方法	检查要求
空间检查	外业实测、内业人机交互检查	平面精度、高程精度满足规范和项目要求。
覆盖度	空间叠加检查	各作业任务的模型成果范围连续且重叠。
模型质量	内业人机交互检查	1. 道路、水系等地物要素的连续且均匀； 2. 建筑物和构筑物外形及纹理清晰准确； 3. 覆盖区域外形及纹理清晰准确。

6.4 数据分析

6.4.1 无人机摄影测量数据分析宜进行地表三维重建，三维重建应符合下列规定：

- 1 瓦片划分准则、起始位置、瓦片尺寸应统一；
- 2 瓦片尺寸宜大于 512×512；
- 3 数据起算原点应保持一致；
- 4 瓦片划分、三维成果应保持空间参考一致；
- 5 宜在比例尺相同、地形平坦且有控制点分布的区域进行分块；
- 6 接边区域应采用公用控制点，接边瓦片应完整；
- 7 应按 1: 500-1: 2000 规定的格网尺寸生成监测区域数字表面模型，宜外扩 200-500 米。

6.4.2 无人机摄影测量变形监测应符合下列规定：

- 1 针对突发的滑坡地质灾害，应利用比例尺符合 1: 5000 的地形图等资料，获取前期 DEM，与当前监测模型数据进行叠加分析，获取监测对象变化情况；

2 应利用多期无人机影像数据分别构建 DEM，对多期 DEM 进行叠加运算，获取监测对象变化矢量、变化速率、变化体积等信息。

6.5 成果提交

6.5.1 无人机摄影测量滑坡监测应提交监测报告、数据成果及专题图件等成果。

6.5.2 监测报告应包括无人机摄影测量的主要内容、任务依据与工作量，采用的无人机图像类型及数据处理方法，监测结果，精度检查与分析情况。

6.5.3 数据成果应包括无人机摄影测量影像、DEM、滑坡变化速率、变化量。

6.5.4 专题图件应包括监测区滑坡分布图、滑坡变形图等。

7 激光雷达遥感监测

7.1 一般规定

7.1.1 激光雷达遥感宜用于植被覆盖度高、地形复杂区域的小范围、高精度滑坡变形快速监测。

条文说明

一般适用于已经发生的或正在发生的公路滑坡灾害监测；尤其适用于地形或监测对象较为复杂，测量人员或仪器与监测对象难以接触等复杂情况下，体积与塌陷变化的监测，形成区域性公路滑坡的立体监测成果。

7.1.2 宜按表 7.1.2 选用合适的激光雷达遥感监测方法。

表 7.1.2-1 激光雷达遥感监测方法

监测方法	适用范围	监测精度
架站式激光雷达	公路沿线单体滑坡的精细变形监测	mm
车载激光雷达	公路沿线高边坡的滑坡灾害监测	dm~m
无人机激光雷达	监测面积小于 100 平方公里的滑坡灾害监测	dm~m
航空激光雷达	大范围滑坡灾害监测	m

7.1.3 应对滑坡表面进行定期或不定期重复扫描工作，准确测定滑坡表面关键部位或目标的三维空间坐标。

7.2 数据采集

7.2.1 实施架站式激光雷达滑坡监测作业应符合下列规定：

- 1 宜选用装备 GNSS 单元和惯性导航单元（IMU）的扫描设备；
- 2 站点宜选在滑坡体附近地面基础稳定且观测视野良好的地方；
- 3 单个或多个站点扫描应完全覆盖滑坡体，多站扫描之间宜具有 10% 以上的重叠度；
- 4 宜在滑坡体表面布置标靶或其他标志物，监测关键点的三维坐标变化。

7.2.2 实施车载激光雷达遥感滑坡监测作业应符合下列规定：

- 1 应在道路沿线的特征点如急转弯点、路旁建筑物交点、路灯底部等处，布设控制点用于精度纠正；
- 2 标靶点应均匀布设在公路两侧，同侧间隔不应大于 500m，两侧交叉布设；
- 3 标靶点平面坐标应采用 RTK 方式测量，点位中误差不大于 0.03m，标靶点高程坐标应按四等水准要求测量，构成附和水准网；
- 4 车载激光雷达作业车辆应在测区内匀速行驶，保证获取点云数据的均匀性和稳定性；
- 5 宜分别对双向车道各自进行多次车载激光雷达扫描，减少 GNSS 信号差异和地物遮挡的影响；同一路段双向点云数据匹配精度应优于 1cm。

7.2.3 无人机激光雷达遥感现场踏勘和航线设计应按本规程第 6.2.1—6.2.4 条的规定执行。

7.2.4 实施无人机激光雷达遥感作业应符合下列规定：

- 1 应测定风速，观察空气能见度；
- 2 应检查飞机和激光雷达各部件连接紧密性、供电接线连接性、电力充足性；
- 3 宜组建通信网络；
- 4 应启动激光雷达和 GNSS 接收机后进行数据采集；
- 5 应监测航高、航速、飞行轨迹及激光雷达工作状态；
- 6 应对采集数据及飞机整体进行检查评估。

7.2.5 无人机激光雷达遥感作业控制网布设与测量应符合下列规定：

- 1 基站点宜选在监测区域周围地面基础稳定且视野开阔的地方；
- 2 基站点应经过测量，满足控制测量等相关规范要求；
- 3 同一个监测区、多期监测周期内应使用相同 GNSS 接收机架设在同一个控制点上；
- 4 航摄时应将基站点与监测对象同步进行观测；
- 5 控制点布设应符合《全球定位系统(GNSS)测量规范》（GB/T 18314）第 6 节规定要求。

7.2.6 无人机作业的安全保障措施应按本规程第 6.2.6 条的规定执行。

7.3 数据处理

7.3.1 激光雷达点云数据预处理应符合下列规定：

- 1 应对激光雷达 GNSS 数据、惯导数据（IMU）和点云数据等进行联合解算，将点云数据转换至成果坐标系统；
- 2 应将点云数据的大地高转化为正常高；
- 3 应将悬于空中或地表以下明显有别于监测区域地表目标的离散点云剔除；
- 4 应对整个监测区域内不同架次获取的点云数据进行拼接处理。

7.3.2 数字表面模型(DSM)制作应符合下列规定：

- 1 应采集带有高程信息的特征线，不同地物特征线应放置在不同图层内；
- 2 应利用已处理后的点云数据和特征线构建不规则三角网生成数字表面模型，并应符合《基础地理信息数字成果 1:500、1:1000、1:2000 数字高程模型》（CH/T 9008.2）的规定；
- 3 数字表面模型应覆盖整个监测区域，宜外扩 200-500 米。

7.3.3 激光雷达点云数字高程模型（DEM）制作应符合下列规定：

- 1 应对地面点、植被、建筑物等进行点云分类；
- 2 应使用分类后的地面点生成数字高程模型，并应覆盖整个监测区域，宜外扩 200-500 米；
- 3 DEM 精度应符合《基础地理信息数字成果 1:500、1:1000、1:2000 数字高程模型》（CH/T 9008.2）的规定。

7.3.4 激光雷达数据处理的质量检查应符合下列规定：

- 1 应对点云数据处理的各个环节进行检查，宜采用目视检查、分类显示、高程显示等方法，对有疑问处宜用断面图进行查询、分析；
- 2 应对地物的特征点进行 RTK 测量，对比点云数据的精度；

3 点云数据存在无法解算或因局部空洞而影响监测精度的应进行补飞与重测。补飞与重测应与原航线一致。

7.4 数据分析

7.4.1 应配准多期点云数据，应统一不同时期获取点云的坐标系、精度、密度和范围。

7.4.2 宜采用点云差分比较、表面模型叠加等方法监测滑坡表面整体的变形情况，应测量其产出部位、变形量及其变形速率。

7.4.3 宜通过对标靶、特征块或特征线（剖面线）等的多期次观测来监测滑坡关键部位的三维位移量、位移方向与位移速率。

7.4.4 宜对激光雷达遥感监测数据进行分析，包括下列内容：

1 应分析多期监测点、线、面的累计变形量以及相邻测次的相对变形量、模型变化等值线图的误差和可靠性；

2 应根据多期或相邻测次扫描监测剖面线提取成果，分析监测剖面线上的地质灾害变形量和变形趋势；

3 应根据多期或相邻测次扫描监测面或模型提取变形面监测成果，绘制垂直位移等值线图，应分析不同部位变形趋势；

4 应采用比较法、曲线图法、特征值统计法和模型法等综合分析法，对滑坡灾害的整体、重要分区、重点部位等的位移变形量、变形速率、变形方向进行综合、定量评价；

5 宜采用移动平均法、指数平滑法和机器学习方法等趋势预测方法，结合地质环境条件等预测滑坡体变形发展趋势。

7.5 成果提交

7.5.1 激光雷达遥感监测成果应提交监测报告、数据成果及专题图件等成果。

7.5.2 监测报告应包括激光雷达遥感监测的主要内容、任务依据与工作量，采

用的激光雷达类型及数据处理方法，监测结果，精度检查与分析情况。

7.5.3 数据成果应包括激光雷达点云、DEM、滑坡变化速率、变化量。

7.5.4 专题图件应包括监测区滑坡变形速率图和累计变形量图等。

征求意见稿

附录 A 主要高分辨率卫星图像参数

表 A 代表性高分辨率卫星图像参数

传感器	载荷	波段号及范围 (μm)	空间分辨率 (m)	幅宽 (km)	侧摆能力 ($^{\circ}$)	重访周期 (天)
高分二号	全色	0.45~0.90	0.8	45	$\pm 35^{\circ}$	5
	多光谱相机	红: 0.45~0.52 绿: 0.52~0.59 蓝: 0.63~0.69 近红外: 0.77~0.89	3.2			
高景一号	全色	0.45~0.89	0.5	12	$\pm 30^{\circ}$	4
	多光谱相机	红: 0.45~0.52 绿: 0.52~0.59 蓝: 0.63~0.69 近红外: 0.77~0.89	2			
高分七号	全色	0.45~0.90	0.8	20	$\pm 32^{\circ}$	5
	多光谱	红: 0.45~0.52 绿: 0.52~0.59 蓝: 0.63~0.69 近红外: 0.77~0.89	3.2			
吉林一号	全色	0.50~0.80	0.72	11.6	$\pm 45^{\circ}$	3.3
	多光谱	红: 0.45~0.52 绿: 0.52~0.60 蓝: 0.63~0.69 模拟近红外: 0.70~0.80	2.88			
快鸟卫星 (Quick Bird)	全色	0.45~0.90	0.61 (星下点)	16.4	—	1~6
	多光谱	蓝: 0.45~0.52 绿: 0.52~0.66 红: 0.63~0.69 近红外: 0.76~0.90	2.44 (星下点)			
Ikonos 卫星	全色	0.45~0.9	1	11.3km $\times$ 1 1.3km (单 景标称成 像模式) 11.3km $\times$ 1 00km (连 续条带成	$\pm 30^{\circ}$	3
	多光谱	1:0.45~0.53 2:0.52~0.61 3:0.64~0.72 4:0.77~0.88	4			

传感器	载荷	波段号及范围 (μm)	空间分辨率 (m)	幅宽 (km)	侧摆能力 ($^{\circ}$)	重访周期 (天)
				像模式)		
GeoEye-1	全色	0.45~0.80	0.41	15.2	—	2~3
	多光谱	蓝: 0.45~0.51 绿: 0.51~0.58 红: 0.655~0.69 近红外: 0.78~0.92	1.64			
worldview-3&4	全色	0.45~0.8	0.31	13.1	—	小于 1
	多光谱	蓝: 0.45~0.51 绿: 0.51~0.58 红: 0.63~0.69 近红外: 0.77~0.90	1.24			
Kompsat-2	全色	0.47~0.83	1	15	30	3
	多光谱	蓝: 0.45~0.52 绿: 0.52~0.60 红: 0.63~0.69 近红外: 0.76~0.90	4			
Pléades	全色	0.47~0.83	0.31	13.1	—	小于 1
			0.31	13.1	—	小于 1
	多光谱	蓝: 0.43~0.55 绿: 0.50~0.62 红: 0.59~0.71 近红外: 0.74~0.94				

附录 B 滑坡遥感解译标志

表 B 滑坡遥感解译标志

滑坡 解译 标志	直接 解译 标志	平面形态标志(滑坡后壁和 滑坡体的形态)	簸箕形、舌形、椭圆形、长椅形、倒梨形、牛角形、平行 四边形、菱形、复合型、树叶形、叠瓦形
		颜色标志	新滑坡后壁土体裸露，色调较浅；滑坡后缘封闭洼地色调 较深，前缘一般呈浅色调
		结构标志	滑坡多呈扇形或圆弧形结构，影像纹理较粗，滑坡上常有 斑点状影纹出现
		地形地貌标志	一般阴坡标志较阳坡明显。连续地貌形态突然被破坏；陡 坡和缓坡两种地貌形态组成的坡体
	间接 解译 标志	斜坡地形特征	河谷中大部分的缓坡地貌，峡谷中垄丘、坑洼、阶地错断， 山坡沟谷出现沟槽突然改道、横断面显著变窄变浅
		植被特征	新滑坡植被多遭受严重，老滑坡植被逐渐恢复
		水文特征	不正常河流弯道、局部河道突然变窄，滑坡地表存在湿地 和泉水，斜坡前部地下水呈线状出露

附录 C 主要雷达卫星图像参数

表 c 代表性雷达卫星图像参数

系统	波段	极化	图幅宽度 (KM)	分辨率 (m)	重复周期 (天)
TerraSAR-X /Tandem-X	X	Full	5-10-30-100	1-3-16	11
Cosmo-SkyMed	X	Full	10-30-200	1-3-15	16
RADASAT-2	C	Full	10-500	3-100	1-24
KOMPSAT-5	X	Full	5-30-100	1-3-20	1
ALOS-PALSAR2	L	Full	25-50-70-350	1-3-6-10-100	14
Sentinel 1	C	Full	20-400	5-40	12
高分三号	C	Full	10-650	1-500	<3