
低空无人机应用公路边坡 巡检技术指南

(试行)

中华人民共和国交通运输部发布

低空无人机应用公路边坡 巡检技术指南

(试行)

中交公路规划设计院有限公司 主编

人民交通出版社

北 京

前 言

为进一步指导和规范低空无人机在公路边坡巡检中的应用，提升巡检工作的智能化、标准化水平，交通运输部组织技术支持单位编制《低空无人机应用公路边坡巡检技术指南（试行）》（以下简称“指南”）。

在编制过程中，编制单位吸收了交通运输部组织实施的低空无人机边坡巡检应用试点成果经验，参考、借鉴了国内无人机产业应用的相关标准、规范和手册，通过多种方式广泛征求有关单位和人员的意见，经多次修改完善，形成本指南。

本指南由7章和3个附录组成，主要内容包括：1 总则、2 术语、3 基本规定、4 巡检方案、5 巡检作业、6 数据处理与成果、7 安全管理与应急响应，附录A 巡检方案模板、附录B 病害智能识别方法、附录C 巡检报告模板。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本指南日常管理组，联系人：刘芳亮（地址：北京市东城区东四前炒面胡同33号；邮编：100010；电子邮箱：liufangliang@ccccltd.cn）。

主 编 单 位：中交公路规划设计院有限公司

参 编 单 位：山东大学

主 编：刘芳亮

参 编 人 员：司小东 邬 都 李 龙 胡 斌 李贞新 张鹏飞
李宏哲 何良盛 崔新壮 徐从杰 徐文城 毛幸全
王俊博 刘 洋 郑全鹏 许 阳 姜海刚 王尔觉

主要审查人员：刘晓东 樊健生 张慧昕 冯 祁 刘春华 侯福金
朱冬春 刘 桐 卢 健

目 录

1 总则 1

2 术语 2

3 基本规定 4

 3.1 一般规定 4

 3.2 作业人员 4

 3.3 设备设施 5

 3.4 作业环境 5

4 巡检方案 7

 4.1 一般规定 7

 4.2 巡检方式 7

 4.3 巡检内容 8

 4.4 巡检航线 10

5 巡检作业 12

 5.1 一般规定 12

 5.2 作业流程 12

 5.3 作业前准备 12

 5.4 飞行作业与数据采集 13

 5.5 运行识别 13

 5.6 作业后核查 14

6 数据处理与成果 15

 6.1 一般规定 15

 6.2 数据处理 15

 6.3 巡检成果 17

7 安全管理与应急响应 18

 7.1 安全管理原则 18

 7.2 风险控制 18

 7.3 应急响应 19

附录 A 巡检方案模板 20

附录 B 病害智能识别方法 22

附录 C 巡检报告模板 25

1 总则

1.0.1 为指导和规范低空无人机在公路边坡巡检中的应用，提升低空无人机巡检安全管理及成果质量水平，推动巡检技术向智能化、数字化方向发展，制定本指南。

1.0.2 本指南适用于各类型公路边坡的低空无人机巡检，包括变形监测、日常巡查、经常检查、定期检查和应急检查。

1.0.3 无人机巡检是人工巡检的有效辅助与补充手段，主要应用于人工巡检难以实施或更具优势的场景，并与现有公路边坡管养体系协同融合。

1.0.4 无人机监测主要针对常规监测手段覆盖不全的问题，通过搭载感知设备，对坡面进行全覆盖的监测，有效地弥补常规监测的不足。

1.0.5 鼓励各地结合实际情况建设无人机巡检平台，推进数据共享共建，提升监管效能。

1.0.6 公路边坡无人机巡检除应符合本指南的规定外，尚应符合国家法律法规以及国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 无人机边坡巡检 unmanned aerial vehicle(UAV)slope inspection

应用无人机进行公路边坡巡查、检查以及监测工作。

2.0.2 民用无人驾驶航空器实名登记管理系统 civil unmanned aircraft registration management system

国务院民用航空主管部门依法履行民用无人驾驶航空器实名登记管理职责所用的信息系统。

2.0.3 运行识别发送模块 operational identification transmitting module

实现广播式运行识别发送功能与网络式运行识别发送功能的软硬件组件。

2.0.4 自动航线飞行巡检 automated route flight inspection

由飞行控制系统控制无人机并开展自主巡检作业。

2.0.5 手动飞行巡检 manual flight inspection

由操作人员人工控制无人机开展巡检作业。

2.0.6 快速巡检 rapid inspection

使用大视场对公路边坡开展粗略普查的巡检作业方法。

2.0.7 精细巡检 detailed inspection

使用小视场近距离对公路边坡开展精细化检测的巡检作业方法。

2.0.8 巡检基本点 inspection of base points

构成巡检网络的基本骨架，确保无人机能够覆盖边坡的所有角落。巡检基本点通常位于边坡的关键位置，如坡顶、坡脚、转折点等，以形成对边坡的全面巡检网络。

2.0.9 巡检特征点 inspection feature points

针对边坡上的特定结构或病害区域进行设置，如排水沟、挡土墙、裂缝、滑坡体等。巡检特征点的设置旨在通过详细观察关键区域，及时发现并评估边坡的潜在风险。

2.0.10 图像尺度因子 image scale factor

物体的真实尺寸与图像中对应物体的像素尺寸之间的比例关系。

2.0.11 重叠率 overlap ratio

相邻影像在航向和旁向的重叠比例，包括航向重叠度、旁向重叠度，是保证影像拼接质量和三维模型重建成功的关键参数。

2.0.12 全类平均正确率 mean average precision(mAP)

一种衡量目标检测算法性能的指标，由所有类别检测结果的平均正确率进行综合加权平均而得到。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 无人机巡检工作流程主要包括巡检方案制定、现场数据采集、数据处理与成果生成等环节。其成果应能满足边坡技术状况评定、养护决策等技术要求。

3.1.2 无人机边坡巡检宜采用自动航线飞行巡检模式进行数据采集；对于航线无法覆盖或需临时重点确认的部位，宜采用手动飞行巡检模式作为补充。

3.1.3 无人机在公路边坡巡检中的应用主要包括下列方式：

- 1 搭载可见光相机，采集边坡表观病害高分辨率影像数据，用于病害的识别、分析、记录与存档。
- 2 搭载激光雷达，采集边坡的激光点云数据，用于坡面变形分析和高精度三维建模。

3.1.4 使用无人机执行边坡的各类巡检工作时，检查内容、检查频率等应满足《公路养护技术标准》(JTG 5110—2023)的相关要求。

3.2 作业人员

3.2.1 作业人员应按中央空中交通管理委员会及中国民用航空局的相关管理规定，取得与作业风险、机型相匹配的操控执照或相应等级证书。

3.2.2 作业人员宜符合交通运输部职业资格中心公布的《公路养护无人机巡检人员职业标准》的要求。

3.2.3 作业人员应熟悉无人机作业过程中的潜在风险及应急处置措施。

3.2.4 作业团队应配备具备岩土工程相关专业背景的人员，熟悉公路边坡的常见病害特征与结构特点，负责识别病害、判断岩土体状态。

3.3 设备设施

3.3.1 用于公路边坡巡检的无人机系统性能宜满足下列要求：

- 1 具备垂直起降和稳定悬停能力。
- 2 具备高精度定位能力(如搭载 RTK 模块或具备等效精度的定位系统)。
- 3 单次起落飞行时间与作业半径满足巡检任务需求。
- 4 具备有效的无线电发射设备型号核准证，符合相关电磁兼容要求。
- 5 防护等级应适应边坡周边环境。

3.3.2 任务载荷(如相机、激光雷达等)的性能应满足数据采集的精度要求。相机宜具备不低于 1 200 万有效像素；激光雷达等设备的精度和量程应与巡检目标相匹配。

3.3.3 无人机应符合《民用无人驾驶航空器实名登记和激活要求》(GB 46761—2025)规定的实名登记与激活要求，主要包括：

- 1 无人机所有者应在民用无人驾驶航空器实名登记管理系统中完成民用无人机的实名登记。
- 2 实名登记信息应至少包括所有者的身份信息、产品名称、产品型号、唯一产品识别码/产品序列号(SN)、使用用途等关键字段。
- 3 应具备激活和取消激活控制功能，激活前和取消激活后民用无人机均不具备飞行能力。
- 4 应具备实名登记状态核验功能，对未满足实名登记要求的民用无人机进行持续实名登记提醒。

3.3.4 无人机应符合《民用无人驾驶航空器系统运行识别规范》(GB 46750—2025)运行识别要求，主要包括：

- 1 应同时具备广播式(蓝牙 5.0 及以上/Wi-Fi 广播模式)和网络式(蜂窝/地面有线/卫星网络)运行识别发送模块。
- 2 应在依靠自身动力移动的全过程中持续发送运行识别信息，更新间隔不大于 1s，且不应具备关闭发送的功能。

3.4 作业环境

3.4.1 无人机使用的空域应符合《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等法律法规的规定，并提前完成飞行计划申请与报备。

3.4.2 无人机巡检作业时，环境条件应满足设备安全操作要求，宜选择在光照均匀、气象条件稳定的环境下进行。

3.4.3 应避开强电磁干扰源等可能影响飞行安全的区域。

4 巡检方案

4.1 一般规定

4.1.1 巡检实施前，应制定巡检方案，内容宜包括巡检目的与对象、作业方式与方法、数据采集内容与标准、作业计划与资源配置、安全预案等。巡检方案模板可参照本指南附录 A。

4.1.2 巡检方案编制前，应收集边坡的勘察资料、设计文件、交竣工资料、施工记录、相关试验报告、监测报告、历次定期检查报告以及历次维修养护资料等基础信息。

4.2 巡检方式

4.2.1 无人机边坡巡检分为快速巡检和精细巡检。日常巡查宜采用快速巡检，经常检查、定期检查、应急检查宜在快速巡检基础上进行精细巡检。

4.2.2 快速巡检宜满足下列要求：

1 飞行参数：相对坡面航高 15 ~ 30m，云台俯仰角 $-45^{\circ} \sim -90^{\circ}$ ，飞行速度 $\leq 10\text{m/s}$ ，航线与边坡走向平行。

2 影像采集：地面分辨率 $\leq 10\text{cm/像素}$ ；航向重叠率 $\geq 15\%$ 、旁向重叠率 $\geq 15\%$ ，地形起伏路段提升至航向重叠率 $\geq 20\%$ 、旁向重叠率 $\geq 20\%$ 。

3 范围与精度：水平定位误差 $\leq 1\text{m}$ ，覆盖范围含坡顶截水沟（无截水沟为坡顶）外侧 5m 至坡脚内侧路面，航带两端预留 $\geq 50\text{m}$ 飞行冗余。

4.2.3 精细巡检宜满足下列要求：

1 飞行参数：相对坡面航高 5 ~ 15m，云台角度与坡面法线偏差 $\leq \pm 10^{\circ}$ ；常规巡检飞行速度 $\leq 3\text{m/s}$ ，建模监测级巡检飞行速度 $\leq 1\text{m/s}$ 。

2 影像采集：常规精细巡检地面分辨率 $\leq 2\text{cm/像素}$ ，航向重叠率 $\geq 60\%$ 、旁向重叠率 $\geq 50\%$ ，高陡边坡提升至航向重叠率 $\geq 70\%$ 、旁向重叠率 $\geq 60\%$ ；建模监测级地面分辨率 $\leq 0.3\text{cm/像素}$ ，航向重叠率 $\geq 80\%$ 、旁向重叠率 $\geq 70\%$ ，滑坡隐患区提升至航向重叠率 $\geq 85\%$ 、旁向重叠率 $\geq 75\%$ 。

3 范围与精度：必须搭载 RTK 模块实现厘米级定位，覆盖范围自公路用地范围向

外延伸不小于 20m；病害区域采用环绕航线补拍，确保同一特征点在不少于 3~5 张影像中清晰呈现。

4.3 巡检内容

4.3.1 无人机边坡巡查、检查的对象应包括边坡坡面、坡面防护与支挡结构物、排水设施及周边环境；对于路堤边坡，还应包括路面。监测对象为公路边坡坡面、坡面防护与支挡结构物及相关结构物。

4.3.2 边坡日常巡查中可使用无人机的场景及技术要求见表 4.3.2。

表 4.3.2 无人机边坡日常巡查场景及技术要求

序号	日常巡查场景	飞行方式	数据采集	适用程度
1	坡体是否存有坡面冲刷、岩屑崩落、局部坍塌、表层溜滑或滑坡	航线	照片	●
2	边沟、排水沟及截水沟等排水设施是否存有淤塞或明显损坏现象	航线	照片	●
3	防护工程及支挡结构是否存有明显破损或失稳等	航线或手动	照片	●
4	路面及路肩是否存有纵向、横向裂缝，或出现沉陷、坑洞、错台等	航线或手动	照片	○
5	坡面植被是否存有枯萎、倒伏或枯死植株，是否遭受冲刷、剥落或破坏	航线或手动	照片	●

注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机。

4.3.3 边坡经常检查中可使用无人机的场景及技术要求见表 4.3.3。

表 4.3.3 无人机边坡经常检查场景及技术要求

序号	经常检查场景	飞行方式	数据采集	适用程度
1	坡面是否存在裂缝、局部坍塌、鼓胀、冲刷、渗水、危岩(石)、崩塌落石等现象	航线	照片	●
2	挡土墙是否出现裂缝、变形、伸缩缝破损、基础冲刷、填缝材料剥落等现象	航线或手动	照片	●
3	锚索(杆)框架梁是否存在锚头破损、框架梁开裂或整体变形等情况	航线或手动	照片	●
4	抗滑桩是否发生桩土分离、裂缝、锚拉桩锚头破损等状况	航线或手动	照片	○
5	护面墙是否出现裂缝、鼓胀、变形等问题	航线或手动	照片	●
6	挂网喷射混凝土是否发生破损、渗水等缺陷	航线或手动	照片	○

续表 4.3.3

序号	经常检查场景	飞行方式	数据采集	适用程度
7	柔性防护网是否存在锚固构件松动破损、网材破损、绳材断裂等损伤	航线或手动	照片或视频	○
8	坡面防护是否出现圬工体破损、坡面冲刷加剧、植被防护体系破坏等情形	航线或手动	照片或视频	○
9	截水沟、排水沟、急流槽、跌水等排水设施是否存在严重堵塞、明显变形或结构性损毁	航线或手动	照片或视频	●
10	路面及路肩是否存在纵向、环向裂缝，是否发生沉陷、坑洞、错台等病害；路堑段边坡前缘路面是否存在隆起或边沟受挤压变形现象	航线或手动	照片或视频	○
11	检修道及扶手等附属设施是否出现破损、明显锈蚀等情况	航线或手动	照片	○
12	边坡红线外影响范围内是否存在超限堆载、违规开挖、地表水异常汇集等威胁边坡安全稳定的不利工况及周边环境变化	航线或手动	照片或视频	●

注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机。

4.3.4 边坡定期检查中可使用无人机的场景及技术要求见表 4.3.4。

表 4.3.4 无人机边坡定期检查场景及技术要求

序号	定期检查场景		飞行方式	数据采集	适用程度
1	路肩	路肩或路缘石缺损	航线或手动	照片	●
2		阻挡路面排水	手动	照片或视频	◎
3		路肩不洁	航线或手动	照片	●
4	路堤与路床	杂物堆积	航线或手动	照片	●
5		不均匀沉降	航线或手动	照片	◎
6		开裂滑移	航线或手动	照片或视频	●
7		冻胀翻浆	航线或手动	照片或视频	○
8	边坡	坡面冲刷	航线或手动	照片	●
9		碎落崩塌	航线或手动	照片	●
10		局部坍塌	航线或手动	照片	●
11		滑坡	航线或手动	照片	●
12	既有防护及支挡结构物	表观破损	航线或手动	照片	●
13		排(泄)水孔淤塞	手动	照片或视频	◎
14		局部损坏	手动	照片	●
15		结构失稳	手动	照片或视频	○

续表 4.3.4

序号	定期检查场景		飞行方式	数据采集	适用程度
16	排水设施	排水设施堵塞(含涵洞)	手动	照片	◎
17		排水设施损坏(不含涵洞)	手动	照片	●
18		排水设施不完善	航线或手动	照片	○

注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机，◎为可采用无人机。

4.3.5 边坡应急检查中可使用无人机巡查边坡灾害范围、类型、程度以及路段通行条件。

4.3.6 边坡监测中可使用无人机的场景如下：

- 1 路基与边坡坡面的位移、裂缝变化、坡面冲刷等。
- 2 坡面防护与支挡结构物的位移、裂缝变化等。

4.4 巡检航线

4.4.1 巡检航线确定工作包括确定巡检点和航线方向。

4.4.2 巡检点应分为巡检基本点和巡检特征点，巡检基本点应满足下列要求：

- 1 以巡检航线规划范围边界为横向、纵向基本点的起点。
- 2 纵向相邻基本点垂直间距应控制在[10m, 15m]范围。
- 3 横向相邻基本点水平间距应控制在[30m, 35m]范围。

4.4.3 特征点根据坡面防护、支挡结构物及排水设施的分布进行确定。

4.4.4 巡检航线由所有确定的巡检基本点和巡检特征点连接形成，具体要求如下：

1 快速巡检航线：

- 1) 巡检基础点之间宜采用直线航线连接，确保无人机沿边坡轮廓线进行高效巡检。
- 2) 巡检特征点之间宜采用点对点直线航线连接，确保无人机能够准确抵达和观察关键区域，病害或破损区域宜采用“之”字形或“S”形航线进行连接，以详细观察病害情况。

3) 巡检基础点与巡检特征点之间按最短路径以直线或轻微弯曲航线连接。

2 精细巡检航线：

- 1) 巡检基础点之间宜采用直线或分段直线航线连接。
- 2) 巡检特征点之间宜采用点对点直线航线连接。病害或破损区域应采用多次往返、环绕式或螺旋式航线连接，实现对病害状况的详细观测。

3) 巡检基础点与巡检特征点之间应采用分段直线或轻微弯曲航线连接，病害严重

区域宜采用环绕式或螺旋式航线连接。

4.4.5 航线方向应与边坡走向保持平行，以最大限度降低飞行操作难度。在特殊地形或复杂环境条件下，可适当调整航线方向，以规避障碍物或优化巡检效率。

4.4.6 航线编辑完成后应核查航线是否存在障碍物遮挡。

5 巡检作业

5.1 一般规定

5.1.1 低空无人机巡检作业应遵循安全第一、质量优先的原则，作业全过程应采取有效措施，保障人员、设备、边坡设施及第三方安全。

5.1.2 对同一区域多次巡检时，应保持航线一致，且航线的飞行高度、飞行速度与飞行姿态角宜保持一致。

5.2 作业流程

5.2.1 无人机边坡巡检作业宜遵循下列基本流程，并可针对不同巡检类型进行调整：

- 1 空域报备：应根据作业项目性质和要求，依法依规向航空管制部门提交空域申请和飞行计划。
- 2 现场踏勘：实地勘察桥址区环境，确认起降点、潜在障碍物和电磁干扰源等。
- 3 方案与航线确认：根据巡检目标和现场情况，最终确认巡检方案与飞行航线。
- 4 现场数据采集：严格执行经批准的方案与航线，完成外业数据采集。
- 5 数据现场核查与归档：对采集数据的质量进行现场快速核查，合格后及时备份与移交。

5.3 作业前准备

5.3.1 作业前必须依据《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等法规，科学制定飞行计划。开展飞行活动前，依法依规报空中交通管理部门批准，按程序实施飞行作业。

5.3.2 作业前应核查无人机系统的实名登记情况、激活状态及运行识别功能是否正常，不符合要求的设备不得投入作业。

5.3.3 作业前应对无人机系统（机身、电池、通信链路）、任务载荷（相机、激光雷达等传感器功能及参数设置）及辅助设备进行系统性检查，确保满足作业任务需求。

5.3.4 应在起飞前设置安全策略，如通信中断后的失控返航行为、合理的返航高度及迫降点。

5.4 飞行作业与数据采集

5.4.1 飞行高度应根据边坡地形特征动态调整，确保稳定悬停状态，且无人机相对坡面的最低飞行高度相对航高(垂直坡面法线方向)不宜低于 3m，以维持安全距离并确保图像采集质量。

5.4.2 无人机抵近公路边坡待巡检部位时，其提升及平移速度应控制在 0.5m/s 以内，避免因运动速度过快导致设备失稳或数据失真。

5.4.3 应按规划航线进行数据采集。可采用单点拍照等时拍照或等距拍照等模式，确保目标被完整、清晰地覆盖。采集过程中应密切监控无人机飞行状态、卫星定位质量与数据实时回传画面。

5.4.4 数据采集质量宜满足下列要求：

1 元数据完整性：采集的原始数据包含完整的元数据信息，包括拍摄时间、经纬度与高程、坐标、无人机型号、传感器参数(如焦距、光圈)、飞行高度、云台角度等。

2 影像数据质量：影像应清晰、对焦准确、色彩反差适中，无明显噪点、条纹或虚影。可采用定点定视角拍摄，以便不同期次数据的对比分析。

3 点云与模型数据基础：对于需生成实景三维模型的数据采集，其影像重叠度与拍摄角度应确保能生成完整、精确的模型。直接采集的激光点云数据覆盖全面、密度均匀。

5.4.5 应详细记录飞行日志，内容包括时间节点、航线坐标、气象参数及作业过程中遇到的异常情况。

5.4.6 敏感数据的传输、存储、使用全生命周期内，应采用国家标准规定的加密算法及去标识化技术，保障数据的保密性、完整性和可用性，防止信息泄露、篡改或非法访问。

5.5 运行识别

5.5.1 无人机应接入国家无人驾驶航空器一体化综合监管服务平台，实时报送飞行位置、速度、高度等状态数据，确保在批准空域内作业。

5.5.2 无人机在运行识别过程中应滚动存储运行识别信息，更新间隔不大于 10s，存储容量应支持不小于 120 飞行小时的信息存储，且不可手动删除。

5.5.3 运行识别发送模块应与无人机飞行控制功能模块交联，运行识别发送模块功能失效时，要求如下：

- 1 无人机起飞前，若运行识别发送模块功能失效，无人机不能起飞。
- 2 无人机在运行过程中广播式运行识别发送功能失效时，应向无人机操控员提供告警并应具备悬停/空中盘旋、返航、降落、开伞等一种或多种处置能力。

5.6 作业后核查

5.6.1 飞行结束后，应立即在现场对采集的数据进行快速核查，主要包括：

- 1 完整性：核对是否按规划航线完成全部数据采集，有无遗漏。
- 2 清晰度：抽查影像是否对焦清晰、无运动模糊，能满足病害识别要求。
- 3 覆盖度：确认关键构件和重点部位无拍摄盲区。

5.6.2 核查合格后，数据应立即备份至两个独立存储介质。若不合格，应评估并执行补飞。

5.6.3 飞行结束后，按有关规定报送飞行活动相关信息。

6 数据处理与成果

6.1 一般规定

6.1.1 数据处理宜构建集数据预处理、智能分析、成果输出于一体的处理流程，鼓励采用“智能识别为主、人工干预为辅”的技术路线，提升效率与一致性。

6.1.2 数据处理成果应遵循“准确、规范、可溯”的原则，满足公路边坡技术状况评定、养护决策及长期管养的需求。

6.1.3 数据与成果应按规定进行存储与归档，并建立备份机制。所有巡检成果数据的归档保存期限应与公路养护档案管理规定保持一致。

6.2 数据处理

6.2.1 数据预处理旨在提升原始数据质量，为后续分析提供标准化、可靠的数据基础，主要包括：

1 影像数据预处理：宜对原始影像进行格式转换、镜头畸变校正、色彩均衡与亮度统一等操作，以消除设备及环境因素造成的图像质量偏差。

2 点云数据预处理：对激光雷达采集的原始点云数据，宜进行噪点剔除、多站点云配准，以及地面点与结构物点云的分类，以获取精确、纯净的结构三维信息。

6.2.2 巡检图像应满足病害分析、人工复核与智能识别的基本要求，质量指标宜符合下列规定：

1 宜采用定点定视角拍摄静态影像，确保多次巡检影像可对比，便于病害动态分析。

2 图像主体清晰，层次、反差、色调适中，无影响判读的模糊、失真问题。

3 图像有效分辨率不低于 $1\,920 \times 1\,080$ 像素，满足病害细节辨识要求。

4 像点位移不大于 1 像素，保障几何精度稳定。

5 图像需完整嵌入拍摄时间、空间坐标、设备及飞行参数等元数据，确保数据可追溯。

6.2.3 三维实景模型应精准还原边坡实景，满足空间量测、可视化分析需求，质量应符合以下规定：

- 1 应采用 2000 国家大地坐标系、1985 国家高程基准，特殊工况需标注基准体系；地理配准精准，无偏移、旋转变形。
- 2 平面与高程精度应符合《1：500 1：1000 1：2000 地形图数字航空摄影测量测图规范》（GB/T 15967—2024）相关规定。
- 3 应完整覆盖边坡全域，横向超出坡顶、坡脚线各 5m，纵向覆盖对应公路桩号区间，包含防护构筑物、排水系统、危岩体等关联区域，无漏洞、盲区。
- 4 拓扑结构完整、水密性良好，无破面、孔洞、飞点等缺陷；无几何扭曲、拉伸变形，分层建模无缝衔接、无错位。
- 5 纹理与实景一致、清晰无错位，色彩均匀、色差可控，坡面细节满足病害识别要求。
- 6 数据量控制在合理范围，兼顾精度与存储、传输效率。

6.2.4 搭载激光雷达边坡监测数据处理应符合下列要求：

- 1 数字高程模型（DEM）、数字表面模型（DSM）、数字正射影像制作方法和流程按《低空数字航空摄影测量内业规范》（CH/T 3003—2021）的规定执行。
- 2 实景地图制作方法和流程按《实景地图数据产品》（GB/T 35628—2017）的规定执行。
- 3 监测变化底图制作宜依据《遥感影像地图制作规范（1：50000/1：250000）》（DZ/T 0265—2014）执行，采用 2000 国家大地坐标系、1985 国家高程基准，高斯-克吕格投影，保留原始数据最优分辨率。
- 4 以监测周期内最高分辨率底图为基准，提取边坡结构与坡面变化信息，生成标准化变化监测成果图。

6.2.5 病害智能识别与分析宜遵循“数据-模型-应用”的技术路径，具体流程如下：

- 1 数据集构建：应基于现场采集的真实病害影像构建数据集。通过数据清洗、标注及增强（如旋转、缩放、色彩调整）等手段扩充数据量，并宜按约 7：2：1 的比例划分为训练集、验证集和测试集。
- 2 模型训练与评估：宜根据病害目标特点（如尺寸、形态）选择合适的算法模型进行训练。训练完成的模型须使用测试集进行性能评估，其全类平均正确率（mAP）宜不低于 0.5，且应具备良好的泛化能力，避免过拟合。模型投入使用前，应通过实际工程数据进行验证。
- 3 智能分析与量测：利用训练好的模型对巡检影像进行自动化病害识别与定位。对识别出的病害，应进行几何参数的自动或半自动量测（如裂缝长度与宽度、剥落面积等），量测方法可参照本指南附录 B。智能识别结果宜进行必要的人工复核与确认，以确保分析的准确性。

6.2.6 数据格式与兼容性应符合下列要求：

- 1 数据格式：边坡三维模型宜采用通用的数据格式进行存储与交换，以确保不同软件系统间的兼容性与互操作性。
- 2 兼容性：模型宜支持导入至主流的三维建模软件、数值分析软件及可视化平台，以便进行分析处理、可视化展示及工程应用。

6.3 巡检成果

6.3.1 无人机巡检的最终成果应系统化，具备完整性、可追溯性及标准化特征；成果的详细程度应根据巡检类型确定。成果主要包括巡查检查报告、监测报告及规范化数据包。巡检报告模板可参照本指南附录 C。

6.3.2 巡查、检查报告在满足《公路路基养护技术规范》(JTG 5150—2023)、《公路养护技术标准》(JTG 5110—2020)要求的基础上，还宜包括下列内容：

- 1 基本信息：巡查时间、路段里程、无人机编号、天气条件。
- 2 巡查结果：正常与异常边坡数量，异常点位置(经纬度及里程桩号)、类型(裂缝、危岩等)。
- 3 处置建议：人工复核、短期监测或立即维修。

6.3.3 监测报告应符合下列规定：

- 1 基础信息：监测周期、边坡编号、无人机型号、传感器类型。
- 2 数据结果：正射影像、三维点云模型及 DSM 数据。
- 3 分析结论：病害(裂缝、滑塌等)位置、尺寸、等级(轻度/中度/重度)及变化趋势(对比历史数据)。

6.3.4 规范化数据包是成果的底层支撑，应分类整理、有序编目，并符合下列规定：

- 1 原始数据包：包含所有采集的原始照片、视频、激光点云数据及对应的定位定姿数据。
- 2 处理后数据包：包含经过预处理的影像、生成的实景三维模型、病害智能识别的结果文件等。
- 3 元数据说明文件：应对数据包的组织结构、命名规则、坐标系统、数据格式等进行文字说明。

6.3.5 交付的成果数据应采用主流、开放或标准化的格式，确保与边坡养护管理系统、资产管理系统等数据兼容且无缝集成。

7 安全管理与应急响应

7.1 安全管理原则

7.1.1 作业单位应按“一机一档”，完善无人机购置、登记、存储、检修、维护、报废等全生命周期档案信息。

7.1.2 作业单位应健全内部管理制度，明确专人负责，全面记录无人机应用场景、地点及飞行时长等飞行数据，确保无人机全链条应用纳入管理。

7.1.3 作业单位应健全合规管理制度，应定期检查无人机系统实名登记状态和运行识别功能，确保设备始终处于合规状态。

7.1.4 作业单位应健全安全管理制度，按规定配置安全设施设备、个体防护装备和应急救援设备，加强无人机、存储场地、起降设施等日常维护，确保设施设备齐全、状态良好。

7.2 风险控制

7.2.1 作业前应进行专项风险评估。评估应涵盖空域、环境、设备及作业流程等方面，识别潜在危险源，并制定针对性的控制措施。

7.2.2 风险控制措施应重点关注下列方面：

1 空域与交通风险：严格遵守空域管理规定，规避敏感区域。在高速公路等区域作业时，应提前协调并设置必要的观察岗，确保不影响既有交通运行。

2 环境风险：应评估并规避强电磁干扰、紊乱气流等环境因素的影响。作业环境条件(如风速、湿度、光照)应满足设备安全操作要求。

3 设备风险：严格按规范进行设备检查与维护，确保无人机系统及各部件状态良好。应预设安全策略，如失控返航、紧急迫降等。

4 操作风险：作业人员应严格按照操作规程执行飞行任务，保持与边坡及其附着物的安全距离，避免不当操作导致的碰撞风险。

7.3 应急响应

7.3.1 作业单位应编制无人机突发事件应急预案，定期组织演练。

7.3.2 发生无人机故障和事故时，要及时采取有效措施，妥善应对处置，并按国家有关规定向相关部门报告。

7.3.3 典型场景的应急响应应遵循下列核心处置程序：

1 通信中断：应立即触发并确认无人机的自动返航程序。若未按预设逻辑响应，应在保证安全的前提下尝试恢复通信连接。持续失联时，应迅速启动设备搜寻程序。

2 设备重大故障：在尚存控制权限时，应将无人机安全飞离公路范围，选择无人人员、无重要设施的开放区域实施紧急迫降或坠毁。

3 气象突变：一旦监测或预报作业区域气象条件超出安全作业阈值，应立即中止任务，操控无人机返航或执行紧急迫降。

4 空中交通管制：接到空管指令后，应无条件立即停止作业，降落无人机，待获得新的许可后方可继续。

5 无人机撞击或坠落：应立即上报，首要任务是划定并封锁可能的影响区域，确保现场安全，防止发生次生灾害。同时保护事故现场，配合进行事后调查与取证工作。

7.3.4 所有应急事件处置完毕后，应在规定时间内形成书面报告，分析事件原因，评估应急响应效果，并据此完善应急预案。

附录 A 巡检方案模板

A.1 适用范围

A.1.1 本模板适用于公路边坡无人机巡查、检查及监测方案的编制。

A.2 方案核心内容

A.2.1 无人机巡检方案宜包含下列章节：

1 任务概况

1.1 巡检目的与依据：明确巡检的性质及所依据的技术规范、文件或指令。

1.2 边坡基本信息：包括编号、位置、类型、规模等。

1.3 巡检范围与重点：明确巡检对象的具体范围，并列出了需要重点关注的部位或已知病害区域。

2 作业计划与资源配置

2.1 作业时间与周期：计划的起止日期，以及对于多日作业的每日作业时段。

2.2 人员组织与职责：列出项目负责人、飞手、安全员、数据处理工程师等及其职责。

2.3 设备配置清单：列出拟使用的无人机机型、任务载荷（相机、激光雷达等）、地面站、通信设备及其他辅助设备。

2.4 交通组织与协调计划：如需临时占用道路或航道，应说明协调方案与安全保障措施。

3 技术方案

3.1 数据采集方案：

a) 飞行方式：明确各部位采用自动航线飞行或手动飞行。

b) 航线规划：说明航线规划的基本原则、航高、速度、图像尺度因子、航向与旁向重叠率等关键参数。

c) 数据采集内容：明确各部位需要采集的数据类型（如高清照片、视频、激光点云、红外影像等）。

3.2 数据处理与分析方法：

a) 数据处理流程：简述数据预处理、三维建模、病害智能识别等计划采用的技术路线。

b) 成果输出：明确最终需要交付的成果清单(如巡检报告、数据库、三维模型等)。

4 安全、质量与应急保障

4.1 危险源辨识与风险控制措施：列出已识别的主要风险(如空域、电磁、气流、交通等)及对应的防控措施。

4.2 质量控制措施：说明在数据采集和数据处理环节保证数据质量的具体方法(如现场核查、过程检查等)。

4.3 应急预案：简述针对通信中断、设备故障、坠机等突发事件的应急处置原则与报告流程。

5 附件

可包括：边坡布置图、重点巡检部位示意图、空域批复文件、设备检定证书等。

附录 B 病害智能识别方法

B.1 病害类型智能识别

B.1.1 病害类型智能识别应包括人工智能算法模型选择、边坡病害数据集收集、数据集制作、模型训练、模型测试和模型应用。

B.1.2 宜根据目标大小、模型大小、检测速度等不同需求场景选择人工智能算法模型，然后采集边坡病害数据，制作数据集，进行模型训练、测试，若模型测试平均精度 $mAP \geq 0.5$ ，可认为该模型有效，否则，重新选择模型，得到病害类型智能识别模型，输入无人机采集待识别病害图像，输出病害检测结果图像及病害检测位置信息等，流程可参见图 B.1.2。

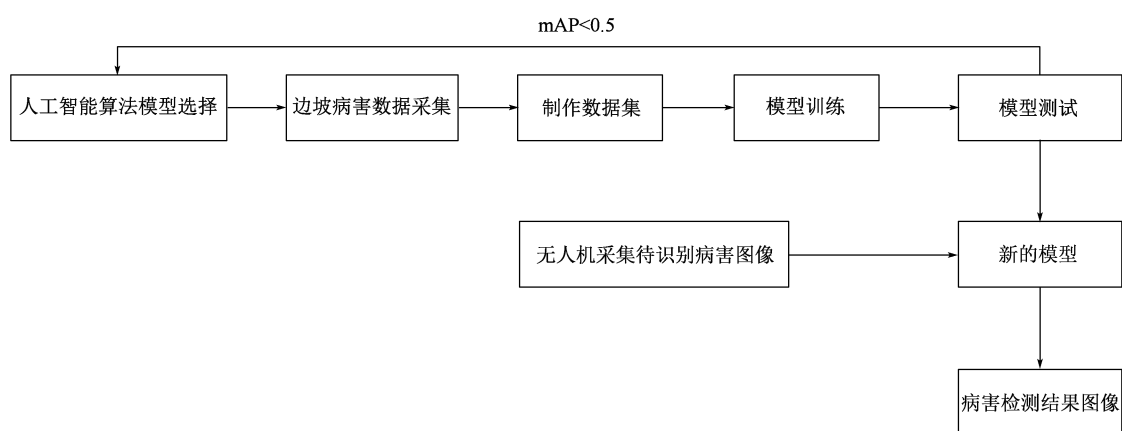


图 B.1.2 病害类型智能识别流程

B.1.3 边坡病害数据集应为基于无人机巡检采集的真实数据。

B.1.4 数据集中每种类型病害照片数量宜不少于 300 张，正样本数量不少于负样本数量，宜根据样本特点及数据集大小合理选择。

B.1.5 宜通过收集漏检、误检样本制作新数据集的方式，对模型进行迭代优化，提高病害检测准确率。

B.2 病害参数智能识别

B.2.1 病害定量参数智能分析宜包括病害检测结果图像输入、病害检测结果灰度化、病害检测结果二值化、病害定量参数计算。

B.2.2 病害定量参数智能分析可参考以下流程：将病害检测结果图像作为输入，然后进行灰度转换为灰度图，将病害检测结果灰度图转换为多幅只包含一种病害的二值化图像，对每幅二值化图像进行病害定量参数计算得到病害参数识别结果，流程可参见图 B.2.2。

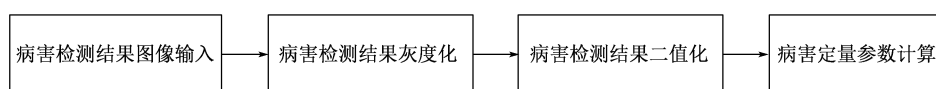


图 B.2.2 病害定量参数智能分析流程

B.2.3 病害面积可按式(B.2.3)计算：

$$S = N_0 \times a \quad (\text{B.2.3})$$

式中：\$S\$——病害面积(\$\text{mm}^2\$)；

\$N_0\$——病害像素个数；

\$a\$——单个像素实际面积(\$\text{mm}^2\$)。

B.2.4 病害定量参数计算病害数量根据病害连通区域个数进行计算。若 \$S < s_l\$，该连通区域面积过小，可认为该连通区域不是病害，应过滤掉。式中 \$s_l\$ 为最小病害面积阈值，宜根据待检测结构部位病害的特征进行取值，病害区域较小时，\$s_l\$ 应取较小值，病害区域较大时，\$s_l\$ 应取较大值。

B.2.5 裂缝实际长度可按式(B.2.5)计算：

$$L = l_0 \times \delta \quad (\text{B.2.5})$$

式中：\$L\$——裂缝实际长度(\$\text{mm}\$)；

\$l_0\$——裂缝像素个数；

\$\delta\$——像素标定值(\$\text{mm}\$)。

B.2.6 若 \$L < l_l\$，该连通区域过短，不符合裂缝细长的特点，可认为该病害不是裂缝，应过滤掉，其中，\$l_l\$ 为最短裂缝长度阈值，宜根据待检测结构部位裂缝的特征进行取值，裂缝较短时，\$l_l\$ 应取较小值，裂缝较长时，\$l_l\$ 应取较大值。

B.2.7 裂缝平均宽度可按式(B.2.7)计算：

$$W = \frac{S}{L} \quad (\text{B. 2. 7})$$

式中： W ——裂缝实际平均宽度(mm)；

S ——病害面积(mm^2)；

L ——裂缝实际长度(mm)。

B. 2. 8 若 $W > w_l$ ，该连通区域的平均宽度过大，不符合裂缝细长的特点，可认为该病害不是裂缝，应过滤掉，其中， w_l 为最大裂缝宽度阈值，宜根据待检测结构部位裂缝的特征进行取值，裂缝较窄时， w_l 应取较小值，裂缝较宽时， w_l 应取较大值。

B. 2. 9 任一点裂缝宽度等于该点裂缝骨架线的垂线到裂缝两侧边缘的距离，裂缝最大宽度等于任一点裂缝宽度的最大值。

B. 2. 10 单个像素实际面积可按式(B. 2. 10)计算：

$$a = \delta^2 \quad (\text{B. 2. 10})$$

式中： a ——单个像素实际面积(mm^2)；

δ ——像素标定值(mm)。

附录 C 巡检报告模板

C.0.1 报告核心章节宜包括下列内容：

1 巡检概况

1.1 任务来源与目的

1.2 边坡基本信息

1.3 作业信息(时间、地点、参与单位及人员)

1.4 设备信息(无人机型号、任务载荷类型及规格)

1.5 作业环境(天气、光照、风速等)

2 数据采集与处理方法

2.1 数据采集方案简述(飞行方式、主要技术参数)

2.2 数据处理流程(包括数据预处理、三维模型重建、病害智能识别所采用的软件与方法,可注明所使用算法的 mAP 值等性能指标)

3 巡检结果分析

3.1 病害总体统计

以表格形式汇总各边坡各类病害的数量、规模。

3.2 主要病害与分析

描述典型病害的位置、形态、尺寸,并附清晰照片。

3.3 病害位置分布图

在正射影像或三维模型上标注有病害编号的位置总图。

3.4 定期检查

须进行路基技术状况指数 SCI 评分,同时将本次主要病害与发展性病害的量化结果与历史数据进行对比,分析其变化情况。

4 结论与建议

4.1 主要结论

总结边坡当前的表观技术状况,指出存在的主要问题。

4.2 养护维修建议

根据病害的严重程度和发展趋势,提出具体、可操作的处置措施(如日常观测、局部维修、专项维修等)及后续巡检重点。

5 附件

附件一：原始数据清单

附件二：病害详细记录表(含编号、类型、照片、尺寸、位置坐标等信息)

附件三：典型病害影像集

附件四：三维模型