

铁路无人机智能巡检平台建设方案

版本：V1.0

1. 方案定位

本方案面向铁路工务、防洪、供电、电务、安防和施工监管等巡检业务，建设一套可落地、可扩展、可持续迭代的无人机智能巡检平台。

平台以无人机自主巡飞为入口，统一接入可见光视频/图像、红外热成像、激光雷达点云、TIF/DEM/DSM 形变数据和飞控定位数据，通过场景化 AI 模型、GIS 空间规则、业务规则引擎和工单闭环机制，实现“自动发现隐患、智能研判风险、精准定位里程、快速推送工单、闭环反馈迭代”的全流程能力。

平台建设遵循一条完整业务链路：无人机按航线完成巡检，系统自动接入多源数据，在地图和三维底座上识别隐患，按线路缓冲区、天窗时间、施工豁免和专业阈值完成风险判定，形成带证据、位置、等级和处置建议的告警工单，人工确认结果再回流到样本库和模型迭代体系。

2. 核心需求总览

2.1 业务范围

项目需求覆盖四类巡检场景：

1. 工务巡查场景：外部风险防控、线路设施排查、路基边坡监测、安防隐患治理、施工规范监管。
2. 防洪点精密监测：基于激光雷达巡飞、LAS 点云处理、TIF 三维数字底座和前后期变化对比，发现体积形变异常。
3. 供电保障场景：接触网异物、接头发热、螺栓缺失、鸟巢等供电设备隐患。
4. 电务巡检场景：信号机破损倾斜、电缆槽盖板缺失、线缆悬挂异物、杆上设备发热。

2.2 系统能力需求

需要建设的能力包括：

- 多源数据接入：无人机图像、视频流、红外热图、激光雷达点云、TIF/DEM/DSM、航线任务、RTK/PPK 定位、云台姿态、相机内外参。
- 多类型 AI 检测：目标检测、实例分割、语义分割、裂缝细粒度识别、变化检测、点云配准与三维形变分析、热异常识别。
- 空间规则判定：按线路中心线、防护网、接触网、边坡、站区、施工区等 ROI 判断是否触发报警。
- 告警与闭环：生成结构化告警，推送巡检管理平台和工单系统，支持人工确认、误报抑制、施工时限豁免、后续新增变化才报警。
- 工程化部署：适配机载计算、机巢边缘服务器或中心云端，使用 ONNX Runtime、TensorRT 等进行推理加速和模型轻量化。
- 数据体系建设：缺陷标签体系、标注规范、数据质量控制、样本迭代、模型版本管理和技术文档沉淀。

2.3 关键输入材料

为保证平台具备稳定的现场交付能力，项目启动阶段需补齐以下基础材料：

- 铁路线路 GIS 数据：线路中心线、里程桩、桥隧涵、站区边界、防护网、接触网塔杆、边坡、挡墙、沟渠、重点防洪点。
- 业务规则：不同隐患的报警距离、面积/体积阈值、温度阈值、禁入区域、天窗时间、施工豁免规则。
- 无人机与载荷参数：相机内参、畸变参数、云台姿态、安装外参、分辨率、焦距、红外测温精度、激光雷达参数。
- 历史巡检数据：可见光图片/视频、红外热图、LAS 点云、TIF 数据、历史告警和人工处置结果。
- 样本标注规范：类别定义、边界框/掩膜/关键点/裂缝线/点云标注格式、困难样本标记方式。
- 系统接口材料：无人机平台 SDK/API、巡检平台 API、工单系统 API、用户组织和权限、告警推送协议。
- 现场验证材料：典型线路、典型病害清单、专家复核结果、误报样本、漏报样本、验收指标。

3. 分场景需求要点

3.1 工务巡查场景

分类	场景	需求要点	业务判定口径	技术方案概要
外部风险防控	违法开挖	检测线路两侧管控范围内开挖、基坑、施工机械，需区分正常养护施工闭环状态	规范可能为 500 米，实际可能按 100 米报警；只要有开挖即报警；铁路养护施工也先上报，确认后按施工时限豁免	施工机械检测 + 基坑/裸土分割 + 线路缓冲区规则 + 施工豁免白名单
外部风险防控	深基坑隐患	识别深基坑或无防护措施基坑，需明确深基坑标准	可先按“大于一定范围即报警”，人工确认后后续不再重复报警	基坑实例分割 + 尺度估算 + 历史变化对比 + 人工确认闭环
外部风险防控	违规堆土	判断堆土是否违规，落地可按画面像素占比或三维体积	体积标准待工务确定；有坐标和三维数据可测算	土堆分割 + 单目/双目/点云体积估计 + 缓冲区规则
外部风险防控	塔吊	检测线路 100 米内塔吊，后续仅新增塔吊报警	100 米内报警；闭环后只报新增	塔吊检测 + GIS 距离计算 + 新增变化检测
外部风险防控	烟火	检测线路 100 米内烟雾、火点	100 米内报警	烟火检测 + 视频时序判断 + 误报过滤
线路设施排查	危树侵限	判断树木与接触网、线路的安全距离	阈值需与工务确认	树冠分割 + 接触网/杆塔定位 + 点云距离计算
线路设施排查	异物漂浮	检测挂在接触网等位置的农用薄膜、施工防尘网	重点为农用薄膜、施工防尘网	小目标检测 + 异物分割 + 接触网 ROI 限定
线路设施排查	广告牌隐患	检测广告牌破损、脱落、倾斜、侵限、违规设置	先关注破损、脱落	广告牌检测 + 破损分类 + 姿态/倾斜估计
线路设施排查	彩钢板清理	检测新增彩钢瓦、破损、脱落	已存在不报警；后续新增、破损、脱落报警，重要程度高	基线库 + 变化检测 + 彩钢板检测/分割
线路设施排查	落石	检测线路板落石、防护网内落石	线路板落石、防护网内落石报警	落石检测/分割 + 轨道/防护网 ROI
路基边坡监测	滑坡预警	检测已发生滑坡、滑塌、落石，也可扩展到前兆	发现滑坡报警	边坡变化检测 + 裂缝/形变识别 + 点云/TIF 对比
路基边坡监测	裂缝识别	检测路基面、边坡、挡墙、隧道口衬砌裂缝	3 cm 宽、50 cm 长左右可作为初始讨论口径，最终以模型能力和工务标准确定	高分辨率采集 + 裂缝分割 + 尺度换算 + 人工复核
路基边坡监测	水毁核查	检测路基漫水、路基沉降垮塌	主要为路基漫水、沉降垮塌	水体分割 + 路基变化检测 + 点云高程差
路基边坡监测	沟渠疏通	检测沟渠堵塞、大量积水	沟渠异物堵塞或大量积水	沟渠 ROI + 异物/积水分割 + 流通状态判定
安防隐患治理	围墙隐患	检测围墙破损	破损报警	围墙检测 + 破损分割/分类

分类	场景	需求要点	业务判定口径	技术方案概要
安防隐患治理	人员入侵	检测防护网内、禁入区域人员，非天窗时间均报警	非天窗时间为 0 点至 4 点，防护网内有人即人员入侵；施工人员也不得进入	人员检测/跟踪 + 防护网 ROI + 时间规则
安防隐患治理	动物防控	检测猪、牛、羊、狗等中大型动物侵入	防护网内报警	动物检测 + 防护网 ROI + 视频确认
施工规范监管	现场规范	检测防护网内和边坡施工人员 PPE 违规	未戴安全帽、未穿反光衣报警	人员检测 + 安全帽/反光衣检测 + 施工区域规则
施工规范监管	施工合规	视觉可检测合规项	未戴安全帽、未穿反光衣	PPE 检测 + 施工任务关联

3.2 防洪点精密监测

场景	需求要点	业务判定口径	技术方案概要
防洪点精密监测	激光雷达巡飞生成 LAS 点云，经处理生产 TIF 三维数字底座；下一次巡飞生成 TIF 与上一次对比，体积变化超过阈值报警	初步以体积超过 1 立方米异常变化报警，并上报变化位置和体积；LAS 到 TIF 可能在机巢前端处理，AI 侧负责接收 TIF 并对比前后变化	点云去噪 + 配准 + 栅格化/DEM 差分 + 体积计算 + 变化区域矢量化 + 工单闭环

关键要求：

- 建立防洪点基准三维底座。
- 每次巡飞数据需与同一坐标系下的历史数据精确配准。
- 输出变化位置、面积、体积、变化方向、置信度和可视化结果。
- 支持降雨后、汛期高频巡飞和异常复核。

3.3 供电保障场景

场景	需求要点	业务判定口径	技术方案概要
接触网异物（高危）	检测接触网高危异物类型	塑料薄膜、施工防尘网、风筝	接触网区域定位 + 异物检测/分割 + 高危类别识别
接头严重发热	明确测温部件清单和温度阈值	待供电专业确认，如接触网接头、电连接线夹、隔离开关等	红外热图接入 + 设备 ROI 检测 + 温度标定 + 阈值/相对温升规则

场景	需求要点	业务判定口径	技术方案概要
螺栓缺失	明确检测位置	主要为杆体上部螺栓；下部螺栓 C4 检测车可发现	超高分辨率采集 + 小目标检测 + 部件模板匹配 + 人工复核
鸟巢	明确检测位置	供电塔杆或接触网横担上方鸟巢	鸟巢检测 + 杆塔/横担 ROI + 误报过滤

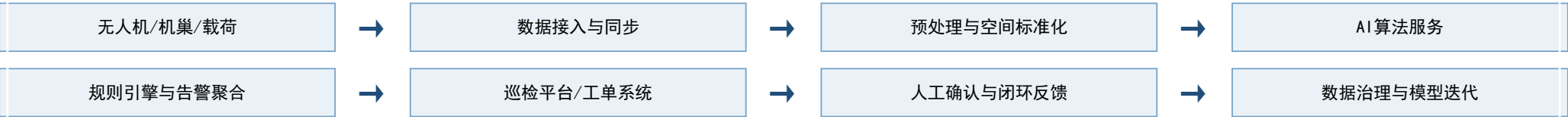
3.4 电务巡检场景

场景	需求要点	业务判定口径	技术方案概要
信号机破损倾斜	检测灯罩破损、机体开裂、部件缺失和倾斜	先关注灯罩破损、水泥底座破损；倾斜 15 度以上可作为初始报警口径	信号机检测 + 部件分割 + 破损分类 + 姿态/倾角估计
电缆槽盖板缺失	判断盖板缺失、破损、移位	主要是缺失和破损，移位较难判断	电缆槽区域分割 + 盖板实例检测 + 缺失序列判定
线缆悬挂异物	检测通信信号线缆异物，标准与接触网异物相同	与接触网异物类似，差异主要在巡飞航线和摄像头侧重点	线缆 ROI + 异物检测/分割 + 航线适配
杆上设备发热	明确纳入测温的设备和阈值	设备主要为信号机、箱盒，无变压器；阈值待电务确认	红外热图 + 设备检测 + 温升阈值 + 历史趋势

4. 总体技术架构

4.1 分层架构

建议采用“采集层 - 数据处理层 - AI 分析层 - 规则决策层 - 平台集成层 - 运维闭环层”的架构。



4.2 数据接入层

输入数据包括：

- 可见光图片：用于目标检测、裂缝识别、设施缺陷识别。
- 可见光视频流：用于实时巡检、烟火、人员/动物入侵、施工机械持续确认。
- 红外热图/测温数据：用于接头发热、杆上设备发热、火点识别。
- 激光雷达点云 LAS/LAZ：用于三维底座、边坡/防洪点形变、危树侵限、堆土/基坑体积测算。
- TIF/DEM/DSM 栅格数据：用于前后期体积变化、沉降、滑坡、水毁核查。
- 飞控与定位元数据：RTK/PPK、WGS84/GCJ02/地方工程坐标、航向、姿态、云台角、相机内外参。
- 平台业务数据：航线、巡检任务、施工计划、天窗时间、历史告警、人工闭环状态。

接入方式可选：

- 厂商 SDK/API：对接大疆 MSCK、Cloud API、PSDK 或纵横 Wayline/Console 等。
- 流媒体接入：RTMP、RTSP、GB/T 28181、WebRTC，用于实时视频分析。
- 文件接入：对象存储、NAS、SFTP、消息通知，用于巡飞后批处理。
- 消息队列：MQTT、Kafka、RabbitMQ，用于告警、任务状态、模型结果异步传递。
- REST/gRPC：用于任务下发、结果查询、工单创建、人工确认回传。

4.3 预处理与空间标准化

核心处理包括：

- 图像去畸变、曝光/白平衡修正、去模糊、雨雾增强、夜间增强。
- 视频抽帧、关键帧选择、目标跟踪、重复帧过滤。
- 红外热图温度标定、发射率设置、环境温度补偿、热图与可见光配准。
- 点云去噪、体素降采样、地面滤波、坐标转换、配准、分割、栅格化。
- 图像与 GIS 的空间映射：将检测框/分割掩膜映射到线路里程、坐标、设施 ID。
- ROI 裁剪：按线路缓冲区、防护网、接触网、杆塔、边坡、沟渠、站区等区域进行检测。
- 基线库构建：对塔吊、彩钢板、基坑、防洪点、边坡等需要“新增才报警”的目标建立历史基线。

4.4 AI 算法服务

推荐采用多模型协同，不把所有场景压到一个大模型中：

- 通用目标检测模型：施工机械、塔吊、人员、动物、车辆、信号机、鸟巢、广告牌、彩钢板等。
- 小目标检测模型：螺栓、线夹、接触网异物、电缆槽盖板、远距离安全帽等。
- 实例/语义分割模型：基坑、堆土、积水、滑坡、落石、裂缝、围墙破损、广告牌破损。
- 变化检测模型：新增塔吊、新增彩钢板、基坑变化、防洪点体积变化、边坡形变。
- 点云/栅格分析模型：点云配准、三维差分、DEM/TIF 差分、体积计算、危树侵限距离计算。
- 热异常模型：设备 ROI 检测 + 温度阈值 + 相对温升 + 历史趋势对比。
- 规则与专家系统：空间距离、天窗时间、施工豁免、告警等级、重复告警合并。

4.5 规则决策与告警闭环

每条告警建议包含：

- 告警 ID、场景类别、缺陷类别、告警等级。
- 发生时间、线路、里程、经纬度/工程坐标、关联设施 ID。
- 图片/视频片段/热图/点云变化图证据。
- 检测框、掩膜、多边形、变化区域、体积/面积/距离/温度等结构化结果。
- 模型版本、置信度、规则命中说明。
- 是否新增、是否在豁免期、是否重复告警。
- 工单状态、处理人、人工确认结果、误报原因、闭环时间。

闭环策略：

- 对正常养护施工、已确认基坑、已确认塔吊、已存在彩钢瓦建立豁免记录。

- 豁免需设置时限、空间范围、责任单位和审批人。
- 对误报样本自动进入再训练候选集。
- 对漏报样本建立高优先级标注任务。
- 对重复告警进行同区域、同目标、同时间窗口聚合。

5. 分场景技术方案

5.1 违法开挖

目标：发现线路缓冲区内开挖、基坑、挖机、砂石车、施工车辆、裸露土方等风险。

可选方案：

1. 施工机械检测方案：训练挖机、吊车、运输车、砂石车、推土机等类别，结合线路 100 米/500 米缓冲区触发报警。
2. 裸土/基坑分割方案：对新出现的裸土、坑洞、施工区域进行语义分割，解决只有基坑没有机械的场景。
3. 视频时序确认方案：通过连续帧跟踪确认机械作业状态，降低静态机械误报。
4. 历史变化方案：将本次巡飞与上次巡飞正射图或关键帧对比，发现新增开挖区域。
5. 规则闭环方案：人工确认正常施工后，在有效时限和空间多边形内不再重复报警。

难点与解法：

- 难点：正常养护施工与违规施工视觉上相似。解法：接入施工计划和人工确认闭环，不仅靠视觉判断。
- 难点：开挖边界不规则。解法：检测机械 + 分割裸土/基坑 + 变化检测联合判断。
- 难点：距离铁路远近影响报警。解法：使用线路中心线和工程坐标做缓冲区计算。

5.2 深基坑隐患

目标：识别铁路周边基坑，判断是否达到报警尺度。

可选方案：

1. 图像分割方案：用实例分割识别基坑轮廓，按像素面积、形状、纹理初筛。
2. 点云体积方案：有激光雷达时估算坑深、坑口面积和体积。
3. 单目尺度估计方案：结合飞行高度、相机内参、地面采样距离 GSD 估算基坑实际尺寸。
4. 变化检测方案：与历史底图对比，发现新增坑洞。
5. 人工确认基线方案：确认后的合法基坑进入白名单，只对扩张或新增变化报警。

难点与解法：

- 难点：深基坑“深”的视觉判断不稳定。解法：优先用点云/DEM 或多视角重建补充深度。
- 难点：影子、水坑、裸土会误判。解法：加入阴影增强、材质分类和多帧确认。

5.3 违规堆土

目标：检测线路周边堆土，评估面积/体积和侵限风险。

可选方案：

1. 堆土分割：识别土堆区域，输出面积和像素占比。
2. 点云体积测算：以历史地形或邻域地面为基准，计算凸起体积。
3. DEM/TIF 差分：用前后期高程差计算新增堆土体积。
4. 规则分级：按距离线路、体积、高度、坡脚关系给出等级。
5. 人工校核：体积阈值未确定前，先以疑似隐患推送复核。

难点与解法：

- 难点：体积阈值未定。解法：系统支持可配置阈值，先积累样本和工务反馈。
- 难点：土色与地面相似。解法：结合高程变化和纹理边界，而非只靠颜色。

5.4 塔吊

目标：检测线路 100 米内塔吊，新增才报警。

可选方案：

1. 可见光目标检测：检测塔身、吊臂、配重等整体目标。
2. 结构分割：对长臂结构做实例分割，提高遮挡场景识别。
3. GIS 距离计算：将塔吊位置投影到地图，计算与线路距离。
4. 新增变化检测：维护塔吊资产基线，已确认塔吊不重复报警。
5. 多次巡飞确认：同一区域多角度出现才提高告警等级。

难点与解法：

- 难点：远距离塔吊细长、容易漏检。解法：高分辨率切片检测 + 多尺度训练。
- 难点：已存在塔吊重复报警。解法：目标指纹、位置聚类 and 闭环状态管理。

5.5 烟火

目标：发现线路附近烟雾、明火或火点。

可选方案：

1. 图像烟火检测：检测烟雾、火焰、燃烧点。
2. 视频时序模型：判断烟雾扩散、火焰闪烁等动态特征。
3. 红外辅助：用热异常验证火点，降低雾、云、灰尘误报。
4. 气象规则：结合风速、湿度、能见度修正置信度。
5. 分级报警：明火直接高危，烟雾按距离线路和持续时间分级。

难点与解法：

- 难点：云雾、扬尘、逆光可能误报。解法：可见光 + 红外 + 时序一致性联合判断。
- 难点：烟火发展快。解法：边缘实时检测，告警链路走高优先级。

5.6 危树侵限

目标：评估树木与线路、接触网、杆塔之间的安全距离。

可选方案：

1. 图像树冠分割：识别树冠范围，结合接触网/杆塔位置粗判。
2. 点云距离测量：从点云中分割树木、线路或接触网，计算三维最短距离。
3. 倾倒风险模型：结合树高、倾角、坡度、风向，评估倒伏后是否侵限。
4. 定期变化监测：记录树冠增长趋势，提前预警。
5. 专家阈值配置：按线路等级、电压等级、地形区域配置阈值。

难点与解法：

- 难点：仅图像很难准确测距。解法：危树类优先采用 LiDAR 点云。
- 难点：树冠和背景混杂。解法：多视角点云聚类 + 语义分割。

5.7 接触网/线缆异物

目标：检测塑料薄膜、施工防尘网、风筝等高危异物。

可选方案：

1. 接触网 ROI 检测：先检测接触网和线缆，再在局部区域识别异物。
2. 小目标检测：高分辨率切片、超分辨率增强、多尺度训练。
3. 分割方案：对薄膜、防尘网这类形态不规则目标做实例分割。

4. 视频确认：异物随风摆动，可通过运动模式降低误报。
5. 多模态辅助：红外/可见光互补，复杂背景下做二次确认。

难点与解法：

- 难点：目标小、形态变化大、背景复杂。解法：ROI 先验 + 高分辨率采集 + 类别专用模型。
- 难点：线缆细，误检多。解法：先定位线缆结构，再限定搜索范围。

5.8 广告牌隐患

目标：发现广告牌破损、脱落、倾斜、侵限或违规设置。

可选方案：

1. 广告牌检测 + 破损分类：先定位广告牌，再判断破损/脱落。
2. 分割破损区域：输出裂口、缺角、脱落区域。
3. 倾角估计：通过矩形边框、关键点或三维姿态估计判断倾斜。
4. 变化检测：发现新增广告牌或状态恶化。
5. 侵限规则：结合距离线路、方向、倒伏范围判定风险。

难点与解法：

- 难点：广告牌样式差异大。解法：先做通用检测，后做状态分类。
- 难点：破损轻微难判。解法：设置“疑似破损”复核等级，不直接高危。

5.9 彩钢板清理

目标：已存在彩钢瓦不报警，新增、破损、脱落报警。

可选方案：

1. 基线巡飞建库：首轮巡飞建立彩钢板位置和外观基线。
2. 新增检测：对比历史影像和当前影像，发现新增彩钢板。
3. 破损/脱落分类：识别散落、卷曲、破碎、松动状态。
4. 风险分级：按距离线路、面积、是否在高处、是否可能被风吹落分级。
5. 人工确认闭环：确认安装牢固后设为低风险基线。

难点与解法：

- 难点：客户要求“新增才报警”。解法：必须建立目标级历史基线，而非单帧检测。
- 难点：彩钢板反光、颜色多变。解法：颜色增强 + 纹理/形状特征 + 变化检测。

5.10 落石、滑坡、水毁、沟渠堵塞

目标：发现线路板落石、防护网内落石、滑坡、路基漫水、沉降垮塌、沟渠堵塞或积水。

可选方案：

1. 可见光检测/分割：识别落石、滑坡裸露面、积水、堵塞物。
2. 点云变化检测：对边坡和防洪点做高程差、体积差分析。
3. TIF 差分：对前后期栅格高程进行差分，输出变化区域。
4. 降雨触发巡检：结合气象雨量，自动提高防洪点巡检频率。
5. 风险分级：按变化体积、坡度、离线路距离、是否侵入防护网分级。

难点与解法：

- 难点：滑坡前兆识别比已发生滑坡难。解法：阶段一检测已发生病害，阶段二加入裂缝/形变趋势。
- 难点：积水与阴影混淆。解法：偏振/多时相/水体分割模型 + 高程低洼规则。

5.11 裂缝识别

目标：识别路基面、边坡、挡墙、隧道口衬砌裂缝。

可选方案：

1. 高分辨率裂缝分割：用专用裂缝分割模型输出裂缝线。
2. 图像增强：去阴影、对比度增强、Retinex、超分辨率，提高细裂缝可见度。
3. 多尺度切片：大图切片后检测，保留 3 cm 级别裂缝细节。
4. 尺度换算：结合 GSD、飞高、相机内参估算宽度和长度。
5. 人工复核流程：裂缝类先作为疑似病害，专家确认后沉淀标注。
6. 三维辅助：对挡墙、衬砌可通过多视角重建或点云辅助判断错台和形变。

难点与解法：

- 难点：3 cm 级裂缝对采集质量要求极高。解法：制定专用低空、定焦、低速航线。
- 难点：水渍、阴影、接缝误报。解法：加入难负样本和结构先验，按材质区域限定检测。

5.12 围墙、人员、动物、施工规范

目标：安防入侵和施工合规监管。

可选方案：

1. 人员/动物检测：通用目标检测模型，结合防护网内 ROI。
2. 目标跟踪：视频中连续出现才报警，过滤偶发误检。
3. 时间规则：非天窗时间触发人员入侵，天窗时间结合施工任务判断。
4. PPE 检测：安全帽、反光衣、人员姿态识别。
5. 围墙破损检测：围墙区域分割后做破损分类。
6. 施工任务关联：施工现场规范告警与施工计划、人员授权、区域边界绑定。

难点与解法：

- 难点：小人、远距离动物误检。解法：高分辨率切片 + 多帧跟踪。
- 难点：施工人员是否授权视觉无法判断。解法：必须接入施工计划和天窗时间。

5.13 防洪点精密监测

目标：通过 LAS/TIF 前后期对比，发现超过 1 立方米的异常变化。

可选方案：

1. TIF 差分方案：接收机巢前端生成的 TIF，直接做前后期栅格差分 and 体积计算。
2. 点云原始方案：接收 LAS/LAZ，进行点云配准、滤波、地面建模和变化检测。
3. 点云 + TIF 混合方案：前端快速 TIF 差分，后台保留点云做复核。
4. 变化区域分割：将显著变化栅格聚类成多边形，输出中心点、面积、体积。
5. 多期趋势分析：不仅看相邻两期，也看近 N 期变化趋势，过滤噪声。
6. 人工三维复核：提供剖面图、差分热力图、点云对比视图。

难点与解法：

- 难点：点云配准误差会被误认为形变。解法：固定控制点、ICP/NDT 配准、稳定区域校正。
- 难点：植被变化影响体积。解法：地面滤波、植被分类、按裸地/植被分层计算。
- 难点：不同巡飞姿态和密度差异。解法：统一航线、统一点云密度、体素化和置信区间。

5.14 供电发热与杆上设备发热

目标：检测接触网接头、电连接线夹、隔离开关、信号机、箱盒等热异常。

可选方案：

1. 绝对温度阈值：设备温度超过专业阈值报警。
2. 相对温升阈值：设备温度相对环境或同类设备高出一定值报警。
3. 历史趋势阈值：同一设备温度较历史均值异常升高报警。
4. 设备 ROI 测温：先检测部件位置，再读取 ROI 的最高温、平均温。
5. 可见光 + 红外配准：用可见光识别设备，用红外读取温度。
6. 分级策略：轻微温升记录观察，严重温升高危报警。

难点与解法：

- 难点：红外温度受距离、角度、发射率影响。解法：固定航线和角度，按设备配置发射率，并做现场标定。
- 难点：设备清单和阈值未定。解法：算法平台支持阈值配置，由供电/电务专业最终维护。

5.15 螺栓缺失

目标：检测杆体上部螺栓缺失。

可选方案：

1. 超高分辨率局部拍摄：为螺栓类目标设计近距离定点拍摄动作。
2. 部件定位 + 模板匹配：先定位杆体/连接件，再对螺栓孔位做缺失判断。
3. 关键点检测：检测应有螺栓位置 and 实际螺栓位置。
4. 多角度复核：同一部件多张照片共同判断。
5. 人工复核优先：早期仅输出疑似缺失，降低误报风险。

难点与解法：

- 难点：螺栓极小，普通巡飞难以稳定识别。解法：不建议作为第一阶段高承诺场景，需专用航线和样本验证后上线。
- 难点：遮挡、锈蚀、反光。解法：多角度采集 + 结构先验 + 专家复核。

5.16 信号机、电缆槽盖板、线缆悬挂异物

目标：电务设备外观缺陷和异物检测。

可选方案：

1. 信号机部件级检测：灯罩、水泥底座、机体、支架分别建模。
2. 倾斜角估计：通过信号机立柱关键点和垂直方向计算角度。
3. 盖板缺失检测：电缆槽长条 ROI 分割后判断连续盖板是否中断。
4. 盖板破损检测：对破损、缺角、断裂纹理进行分类。
5. 线缆异物检测：沿通信信号线缆 ROI 做异物检测，标准与接触网异物复用。
6. 设备发热检测：信号机、箱盒可见光定位后读取红外温度。

难点与解法：

- 难点：盖板移位“不好判断”。解法：阶段一只做缺失/破损，阶段二用线性排列规则探索移位。
- 难点：信号机倾斜受拍摄角度影响。解法：结合相机姿态和杆体三维姿态校正。

6. 技术难点与解决思路汇总

难点	影响	解决思路
业务标准未完全确定	阈值、报警范围、等级难以一次定死	将阈值、范围、时间窗口、豁免规则做成配置；先以专家复核驱动标准收敛
数据样本不足	模型泛化差，长尾缺陷难识别	首轮巡飞建样本库；主动学习；误报/漏报回流；合成数据和迁移学习辅助
小目标识别难	螺栓、线缆异物、远距离 PPE 容易漏检	高分辨率航线、图像切片、超分辨率、局部 ROI、专用模型
复杂背景误报	石头、阴影、水渍、反光、云雾会干扰	加入难负样本；多模态验证；时序确认；空间 ROI 约束
坐标转换复杂	告警难以落到里程和设施 ID	统一 WGS84/GCJ02/地方工程坐标转换；相机内外参标定；GIS 资产映射
多源数据同步	可见光、红外、点云不一致导致融合错误	统一时间戳；记录云台/飞控姿态；做外参标定；按轨迹插值对齐
点云配准误差	形变检测误报	使用稳定控制点、ICP/NDT、体素化、误差模型、多期趋势

难点	影响	解决思路
三维体积估算误差	堆土、基坑、防洪点报警不准	LiDAR 优先；DEM/TIF 差分；设置置信区间；人工复核高风险变化
施工/养护场景难区分	正常施工也可能报警	接入施工计划、天窗时间、人工确认和豁免白名单
实时性与算力受限	边缘端无法运行过大模型	模型蒸馏、剪枝、量化、TensorRT/ONNX Runtime、分级推理
重复告警	用户疲劳，工单过多	空间聚类、目标跟踪、历史基线、闭环状态和时限豁免
验收指标不清	交付风险高	每类场景定义 Precision、Recall、漏报率、误报率、定位误差、处理时延
巡飞质量不稳定	模糊、过曝、尺度变化影响识别	制定采集规范；图像质量评分；低质量重飞；航线按场景定制
夜间/雨雾/逆光	视觉识别下降	红外辅助、图像增强、低照度模型、天气规则、必要时降低自动判定等级
模型上线后漂移	新区域、新季节、新设备样式导致性能下降	数据监控、置信度分布监控、周期复训、灰度发布、模型回滚
安全合规	铁路生产系统对稳定性要求高	私有化部署、权限审计、日志留存、接口限流、离线容灾

7. 可选算法路线

7.1 目标检测路线

适用场景：施工机械、塔吊、人员、动物、鸟巢、广告牌、彩钢板、信号机、箱盒、PPE。

方案选择：

- 轻量实时检测：适合边缘部署和视频流实时告警。
- 高精度检测：适合巡飞后离线分析和疑难小目标。
- 两阶段检测：先大场景定位，再局部裁剪精检。
- 类别专用检测：对螺栓、异物、盖板等长尾小目标单独训练。

推荐策略：

- P0 阶段使用通用检测模型覆盖高频大目标。
- P1 阶段对异物、盖板、PPE、小目标做专用模型。

- P2 阶段加入多任务模型和主动学习。

7.2 分割路线

适用场景：基坑、堆土、裂缝、积水、滑坡、落石、围墙破损、广告牌破损、彩钢板破损。

方案选择：

- 语义分割：适合区域类隐患，如积水、滑坡面、裸土。
- 实例分割：适合多个独立目标，如落石、彩钢板、广告牌。
- 交互式/半自动分割：适合早期标注和专家复核。
- 裂缝专用分割：适合细长目标，需要高分辨率和后处理。

推荐策略：

- 分割输出应转化为面积、长度、宽度、位置等结构化指标。
- 对边界不清晰场景，用“疑似区域 + 复核”而非直接高危报警。

7.3 变化检测路线

适用场景：新增塔吊、新增彩钢板、基坑扩张、堆土新增、防洪点形变、边坡滑坡。

方案选择：

- 图像配准 + 差分：实现快，但对光照和视角敏感。
- 深度变化检测：对复杂光照更稳，但需要标注数据。
- 目标级基线对比：对塔吊、彩钢板等目标最实用。
- 三维变化检测：对体积和高程变化最可靠。

推荐策略：

- 需要“新增才报警”的场景必须建设基线库。
- 对变化类告警输出变化前后对比图，便于人工确认。

7.4 点云与三维路线

适用场景：防洪点、危树侵限、堆土体积、基坑深度、边坡形变、路基沉降。

方案选择：

- PCL/Open3D 处理：点云滤波、配准、分割、聚类、体积计算。
- DEM/DSM/TIF 栅格差分：适合防洪点和大范围边坡。
- 点云语义分割：区分地面、植被、构筑物、线路设施。
- 多期趋势分析：识别持续形变，过滤单期噪声。

推荐策略：

- 防洪点优先采用“TIF 差分 + 点云复核”的混合方案。
- 危树和堆土体积优先使用点云，图像方案作为补充。

7.5 多模态融合路线

适用场景：烟火、设备发热、接触网异物、复杂环境缺陷、三维测量。

方案选择：

- 后融合：各模态独立出结果，规则层融合，工程落地快。
- 中融合：对齐 ROI 后融合特征，提高准确率。
- 前融合：输入级融合，对标定和同步要求最高。
- 人机融合：AI 先筛选疑似，专家确认后回流训练。

推荐策略：

- 第一阶段采用后融合，便于快速上线。
- 对红外测温 and 点云形变等强依赖空间对齐的场景，再逐步做中融合。

7.6 规则引擎路线

适用场景：线路距离、禁入区域、天窗时间、施工豁免、设备阈值、告警等级。

方案选择：

- 配置化规则：适合频繁调整的业务阈值。
- 空间规则：基于 GIS 多边形、缓冲区、里程范围。
- 时序规则：基于天窗时间、持续时长、重复出现次数。
- 闭环规则：基于人工确认、工单状态、豁免时限。

推荐策略：

- AI 只负责“看见什么”，规则引擎负责“是否需要报警、报给谁、如何闭环”。
- 所有规则命中原因都要可解释，方便客户验收。

8. 部署方案选择

8.1 云端/中心端离线分析

特点：

- 巡飞后上传图片、视频、点云，中心端批量分析。
- 算力充足，适合高精度模型和点云重处理。

- 实时性较弱。

适用：

- 防洪点精密监测。
- 大范围巡飞后复核。
- 裂缝、螺栓等高精度离线任务。

8.2 机巢边缘服务器分析

特点：

- 数据在机巢或线路附近边缘服务器处理。
- 能兼顾实时性、算力和数据安全。
- 适合大多数项目落地。

适用：

- 烟火、人员入侵、动物入侵、施工机械。
- LAS 到 TIF 前端处理。
- 告警快速推送。

8.3 机载端实时分析

特点：

- 在无人机或载荷侧直接推理。
- 延迟最低，但算力、电力、散热受限。
- 模型需要极致轻量化。

适用：

- 高危异物、烟火、人员入侵等需要即时发现的少数场景。
- 航线自动补拍或目标跟随。

8.4 混合分级部署

推荐采用混合方案：

- 机载端：低延迟粗检，高危事件即时提示。
- 机巢边缘端：主力实时分析和告警生成。
- 中心端：高精度复核、点云重算、模型训练、报表分析。

9. 数据与标注体系

9.1 标签体系

建议建立四层标签：

1. 一级业务域：工务、防洪、供电、电务、安防、施工监管。
2. 二级场景：违法开挖、塔吊、裂缝、接触网异物等。
3. 三级目标/缺陷：挖机、基坑、塑料薄膜、灯罩破损、盖板缺失等。
4. 四级属性：新增/存量、严重程度、是否侵限、是否在防护网内、是否已闭环。

9.2 标注格式

建议按任务类型区分：

- 检测类：边界框 + 类别 + 遮挡程度 + 目标尺寸等级。

- 分割类：实例掩膜或语义掩膜。
- 裂缝类：裂缝线、宽度、长度、所属结构面。
- 点云类：点云类别、变化区域、控制点、地面/植被/构筑物分类。
- 热异常类：设备 ROI、最高温、平均温、环境温度、发射率。
- 规则类：ROI 多边形、线路缓冲区、禁入区域、施工豁免区。

9.3 数据闭环

数据闭环流程：

1. AI 生成告警。
2. 用户确认真实/误报/重复/正常施工/需观察。
3. 系统自动回写样本库。
4. 数据管理员抽样质检。
5. 标注团队补充标注。
6. 算法团队训练新版本。
7. 灰度发布和 A/B 对比。
8. 性能达标后替换生产模型。

9.4 数据质量控制

关键检查项：

- 图像清晰度、曝光、目标占比、拍摄角度。
- GPS/RTK 定位是否有效。
- 云台角、飞高、焦距是否符合场景采集规范。
- 红外测温是否有标定参数。

- 点云密度、重叠率、控制点、配准误差。
- 标注一致性和专家复核比例。

10. 接口与系统集成方案

10.1 无人机平台对接

对接内容：

- 航线任务下发、暂停、恢复、终止。
- 无人机状态、机巢状态、电池状态、载荷状态。
- 实时视频流、图片、红外热图、点云数据。
- RTK/PPK、姿态、云台、相机参数。
- 巡飞完成事件和数据上传事件。

可选方式：

- 大疆 Cloud API/MSDK/PSDK。
- 纵横 Wayline/Console API。
- 厂商开放协议 + 文件/流媒体接入。
- 自定义载荷通过 PSDK 输出结构化数据。

10.2 巡检平台与工单系统对接

核心接口：

- 巡检任务接收：任务 ID、线路、里程、航线、目标场景、时间窗口。
- AI 结果推送：告警 ID、类别、等级、位置、证据、置信度、规则解释。

- 工单创建：责任单位、处置建议、截止时间、附件。
- 工单回写：真实/误报/重复/正常施工/已处置/延期。
- 白名单/豁免：空间范围、时限、原因、审批人。
- 统计报表：按线路、类别、单位、时间段统计。

10.3 结果数据结构建议

建议每个 AI 结果统一为结构化 JSON：

```
{  
  
  "alarm_id": "AI-20260720-000001",  
  
  "task_id": "inspection-task-id",  
  
  "scene": "违法开挖",  
  
  "category": "挖机",  
  
  "severity": "high",  
  
  "confidence": 0.91,  
  
  "time": "2026-07-20T17:00:00+08:00",  
  
  "location": {  
  
    "line": "线路名称",  
  
    "mileage": "K123+456",  
  
    "wgs84": [116.0, 39.0],  
  
    "project_coord": [500000.0, 4300000.0]  
  },  
  
  "geometry": {
```

```
"bbox": [100, 120, 300, 260],

"polygon": [[100, 120], [300, 120], [300, 260], [100, 260]]

},

"measurements": {

  "distance_to_track_m": 83.2,

  "area_m2": 12.5,

  "volume_m3": null,

  "temperature_c": null

},

"evidence": {

  "image_url": "oss://bucket/path/image.jpg",

  "video_clip_url": "oss://bucket/path/clip.mp4",

  "pointcloud_url": null

},

"rule_hits": ["线路100米内", "非豁免区", "新增目标"],

"model": {

  "name": "uav-rail-detector",

  "version": "v1.0.0"

}

}
```

11. 实施优先级建议

11.1 P0：优先 MVP 场景

优先选择目标清晰、样本容易获得、业务价值高、工程闭环明确的场景：

- 违法开挖：挖机、施工车辆、基坑、裸土。
- 塔吊：100 米内检测和新增报警。
- 烟火：可见光 + 视频时序，必要时红外辅助。
- 人员入侵：防护网内、非天窗时间报警。
- 动物防控：中大型动物侵入防护网。
- 施工规范：安全帽、反光衣。
- 接触网/线缆异物：塑料薄膜、防尘网、风筝。
- 鸟巢：供电塔杆或接触网横担上方。
- 电缆槽盖板缺失/破损。
- 围墙破损。

11.2 P1：第二阶段增强场景

- 深基坑隐患：结合面积、深度、变化和人工确认。
- 违规堆土：面积/体积估算。
- 彩钢板新增、破损、脱落。
- 广告牌破损、脱落、倾斜。
- 落石、防护网内落石。
- 水毁核查、沟渠堵塞/积水。
- 信号机灯罩破损、水泥底座破损、倾斜。
- 供电/电务设备发热。

11.3 P2：高精度与三维场景

- 防洪点 TIF/点云体积变化。
- 危树侵限三维距离测量。
- 边坡滑坡前兆、形变趋势。
- 裂缝识别和尺度测量。
- 螺栓缺失。
- 盖板移位。

11.4 推荐里程碑

阶段	时间建议	目标	交付物
需求冻结与数据盘点	1-2 周	明确场景、阈值、接口、采集规范	需求规格书、标签体系、接口清单、样本清单
MVP 数据接入与基础检测	4-6 周	打通无人机数据、实现 P0 类检测初版	数据接入服务、P0 模型、告警 API
业务闭环与规则引擎	4-6 周	接入巡检平台/工单，支持豁免和闭环	规则引擎、告警聚合、工单回写
多场景扩展	2-3 个月	覆盖 P1 场景，提升准确率	场景模型、标注库、验收报告
点云/红外/三维增强	2-4 个月	防洪点、危树、发热、形变等能力	点云/TIF 分析、热异常分析、三维可视化
工程化和规模化运维	持续	模型轻量化、监控、复训、灰度发布	MLOps、模型版本管理、运维看板

12. 验收指标建议

12.1 算法指标

- 检测类：Precision、Recall、mAP、误报率、漏报率。
- 分割类：mIoU、Dice、边界误差、面积误差。
- 裂缝类：最小可识别宽度、长度误差、漏检率。

- 点云类：配准误差、体积误差、高程差误差、变化区域定位误差。
- 热异常类：测温误差、阈值命中率、异常召回率。

12.2 业务指标

- 告警到达时延。
- 告警位置误差：经纬度、线路里程、设施 ID。
- 工单自动创建成功率。
- 重复告警合并率。
- 人工确认闭环率。
- 按场景统计的有效告警率。
- 巡飞数据入库完整率。

12.3 建议验收方式

- 每类场景至少准备正样本、负样本、困难样本和跨线路样本。
- 高风险场景优先看漏报率，普通场景兼顾误报率。
- 对新场景先验收“疑似告警发现能力”，再逐步提高自动判定等级。
- 对点云体积变化需要使用人工测量或专业软件结果作为对照。

13. 项目组织与角色建议

项目组织需要覆盖算法研发、数据工程、平台集成、边缘部署和现场交付等关键能力：

- 核心算法研发：CV 检测/分割、点云处理、红外热异常、多模态融合、变化检测。
- 数据链路对接：大疆/纵横等无人机平台 SDK/API，图像、视频流、点云和任务数据接入。
- 系统集成：巡检平台、工单系统、告警平台、数据协议、任务下发和闭环回传。

- 工程化部署：模型量化、剪枝、ONNX Runtime/TensorRT、边缘端推理、Linux 服务化。
- 标准体系建设：标签体系、标注规范、质量控制、模型评测、技术文档。
- 跨团队协作：无人机厂商、外包团队、工务/供电/电务专业、平台研发、运维团队。

建议团队配置：

- 算法与平台技术负责人：总体方案、算法路线、交付质量把控。
- CV 算法工程师：目标检测、分割、裂缝、小目标、PPE。
- 点云算法工程师：LAS/TIF、配准、体积、形变、危树。
- 红外/多模态工程师：热图配准、设备测温、烟火融合。
- 数据工程师：数据接入、样本库、标注平台、数据质量。
- 后端工程师：API、告警、规则、工单、权限、日志。
- 边缘部署工程师：推理服务、TensorRT/ONNX、设备适配、监控。
- 测试/交付工程师：现场验证、验收样本、问题闭环。

14. 风险与应对

风险	表现	应对
客户标准反复变化	阈值、距离、类别定义调整	配置化规则 + 版本化需求确认
样本无法覆盖长尾	稀缺病害难训练	先疑似告警 + 人工复核，持续积累
采集质量不足	小目标、裂缝识别不达标	为每类场景制定专用航线和拍摄规范
接口联调周期长	无人机平台/工单平台文档不完整	先定义中间协议和模拟器，分阶段联调
点云处理链路重	数据量大、配准耗时	前端 TIF 快速处理 + 后台点云精算
误报导致用户不信任	工单过多、重复告警多	告警分级、重复合并、白名单和人工确认
边缘算力不足	多模型无法实时运行	模型分级、任务调度、异步处理、硬件选型
环境变化导致漂移	季节、天气、线路差异	持续监控、定期复训、跨区域测试

15. 推荐落地路线

第一步：先不要追求所有场景“一步到位”。优先打通无人机数据接入、空间规则、告警闭环和 P0 场景模型，建立可跑通的业务闭环。

第二步：围绕客户最关心的告警质量，建设样本库、误报漏报回流、白名单/豁免机制和模型评测体系。

第三步：再扩展点云/TIF、红外热异常、裂缝、小目标等高难度场景。高难度场景要先做可行性验证，明确采集条件、验收样本和人工复核流程。

第四步：形成“场景模型 + 空间规则 + 告警闭环 + 数据迭代”的长期运营体系。铁路巡检不是单次模型交付，而是持续迭代的数据工程和运维工程。

16. 一句话方案总结

本项目应采用“多源数据接入 + 场景化 AI 模型 + GIS 空间规则 + 人工确认闭环 + 边缘/中心混合部署”的技术路线：先用可见光检测和规则引擎快速覆盖高价值风险，再逐步引入点云三维变化、红外热异常和多模态融合，最终形成可持续迭代的铁路无人机智能巡检平台。