

# 低空无人机应用公路桥梁巡检技术指南（试行）

中交公路规划设计院有限公司 主编

## 前 言

为进一步指导和规范低空无人机在公路桥梁巡检中的应用,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桥梁巡检技术指南》(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桥梁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 巡检报告模板、附录C 病害智能识别方法。

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: 清华大学

北京工业大学

广东省公路建设公司

主 编: 刘芳亮

参 编 人 员: 李书韬 鄂 都 李 龙 刘宇飞 许维炳 周旭东

李贞新 李建勇 毛幸全 李小龙 王 凯 于 奇

主要审查人员: 刘晓东 樊健生 周玉波 汪 波 钟 铭 朱 彦

蒋 彧 郝朝伟 刘 桐 刘正华

# 目 次

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 .....	6
4 巡检方案 .....	7
4.1 一般规定 .....	7
4.2 巡检内容与数据采集要求 .....	7
5 巡检作业 .....	13
5.1 一般规定 .....	13
5.2 作业流程 .....	13
5.3 作业前准备 .....	13
5.4 飞行作业与数据采集 .....	14
5.6 作业后核查 .....	16
6 数据处理与成果 .....	17
6.1 一般规定 .....	17
6.2 数据处理 .....	17
6.3 巡检成果 .....	18
7 安全管理与应急响应 .....	20
7.1 安全管理原则 .....	20
7.2 风险控制 .....	20
7.3 应急响应 .....	21
附录 A 巡检方案模板 .....	22
A.1 适用范围 .....	22
A.2 方案核心内容 .....	22
附录 B 巡检报告模板 .....	24
B.0.1 报告核心章节宜包括下列内容: .....	24
附录 C 病害智能识别方法 .....	26
C.1 病害类型智能识别 .....	26
C.2 病害参数智能识别 .....	27

# 1 总则

**1.0.1** 为指导和规范低空无人机在公路桥梁巡检中的应用,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桥梁的低空无人机巡检,包括日常巡查、经常检查、定期检查和特殊检查。

**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,并与现有公路桥梁管养体系协同融合。

**1.0.4** 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。

**1.0.5** 公路桥梁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 unmanned aircraft

没有机载驾驶员、自备动力系统的航空器，并配有相关的遥控站、所需的指挥和控制链路以及设计规定的任何其他部件，能完成特定任务的一组设备。

### 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 民用无人驾驶航空器激活 civil unmanned aircraft activate

将民用无人驾驶航空器进行初始化，使其具备飞行能力的活动。

### 2.0.4 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。

### 2.0.5 桥梁巡检 bridge inspection

对桥梁进行日常巡查、经常检查、定期检查和特殊检查。

### 2.0.6 自动航线飞行巡检 automated route flight inspection

由飞行控制系统控制无人机开展的自主巡检作业。

### 2.0.7 手动飞行巡检 manual flight inspection

由操作人员人工控制无人机开展的巡检作业。

### 2.0.8 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。

### **2.0.9 影像重叠率 image overlap ratio**

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

### **2.1.0 病害智能识别 intelligent damage identification**

基于人工智能算法对采集的图像或视频数据自动识别桥梁表观病害的技术。

### **2.1.1 实时载波相位差分 real-time kinematic, RTK**

一种基于全球卫星导航系统的高精度定位技术，通过基准站与流动站之间的载波相位差分观测实现厘米级实时定位。

### **2.1.2 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的。

## 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。其成果应能满足桥梁技术状况评定、养护决策等标准要求。

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

**3.1.3** 无人机在公路桥梁巡检中的应用方式主要包括：

1 搭载可见光相机，采集桥梁结构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 搭载可见光相机，采集拉索、吊索、吊杆等构件的振动视频，用于结构动力学分析。

3 搭载激光雷达，采集桥梁结构的激光点云数据，用于结构变形分析和高精度三维建模。

4 搭载红外热像仪、声学传感器等其他数据采集设备，用于检测内部缺陷、渗漏或异常声响。

**3.1.4** 使用无人机执行桥梁的各类巡检工作时，检查内容、检查频率等应满足 JTG 5120—2021 相关要求。

### 3.2 作业人员

**3.2.1** 作业人员应按国家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》要求。

**3.2.3** 作业团队宜配备具备桥梁工程背景的专业人员，负责识别病害、判断结构状态。

**3.2.4** 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，并熟悉公路桥梁的常见病害特征与结构特点。

### 3.3 设备设施

**3.3.1** 用于公路桥梁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 防护等级应适应桥梁周边环境。

**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 1200 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 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 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** 在进行定期检查和特殊检查前，应制定详细的巡检方案。日常巡查和经常检查可制定简化的作业计划。巡检方案模板可参照本指南附录 A。

**4.1.2** 巡检方案的核心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。

### 4.2 巡检内容与数据采集要求

**4.2.1** 桥梁日常巡查中可使用无人机的场景及技术要求见下表。

表 4.2.1 无人机桥梁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	桥路连接处是否异常	航线或手动	照片	○
2	伸缩缝是否有明显破损	航线或手动	照片	◎
3	栏杆或护栏等有无明显缺损	航线或手动	视频或照片	○
4	标志标牌是否完好	航线或手动	照片	●
5	桥梁线形是否存在明显异常	航线或手动	照片	◎
6	桥梁是否存在异常的振动、摆动和声响	航线或手动	视频	○
7	桥梁安全保护区是否存在侵害桥梁安全的情况	航线或手动	视频或照片	●

注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机，◎为可采用无人机

**4.2.2** 桥梁经常检查中可使用无人机的场景及技术要求见下表。

表 4.2.2 无人机桥梁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	桥梁结构有无异常的变形和振动及其他异常状况	航线或手动	视频或照片	○
2	外观是否整洁，构件表面是否完好，有无损坏、剥落、起皮、锈迹等面状病害	航线	视频或照片	●
3	钢结构螺栓有无松动或缺失	航线	照片	●
4	斜拉索、吊杆（索）、系杆等索结构锚固区的密封设施是否完好，有无积水或渗水痕迹	航线	照片	●
5	伸缩缝是否堵塞、局部破损	航线	照片	◎
6	栏杆、护栏有无破损、缺失、锈蚀、移动或错位	航线	照片	○
7	排水设施有无堵塞和破损	航线或手动	照片	○
8	墩台有无明显的倾斜、损伤、开裂及是否受到车、船或漂流物撞击而受损	航线或手动	照片	●
9	基础有无冲刷、损坏、悬空	航线或手动	照片	◎
10	翼墙（侧墙、耳墙）、锥坡、护坡、调治构造物有无缺损、开裂、沉降和塌陷	航线或手动	照片	●
11	交通信号、标志、标线、照明设施以及桥梁其他附属设施是否完好、正常工作	航线	照片	●
注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机，◎为可采用无人机				

4.2.3 梁式桥定期检查中可使用无人机的场景及技术要求见下表。

表 4.2.3 无人机梁式桥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	混凝土构件有无渗水、蜂窝、麻面、剥落、掉角、空洞、孔洞、露筋及钢筋锈蚀	航线	照片	●
2	钢构件涂层劣化情况；构件锈蚀、变形、局部损伤；铆钉和螺栓松动、脱落或断裂	航线	照片	●
3	支座有无错位、脱空；橡胶支座是否老化、开裂，有无位置串动、脱空，有无过大的剪切变形或压缩变形；支承垫石是否开裂、破损；支座螺纹、螺帽是否松动，锚螺有无剪切变形，上下座板（盆）的锈蚀	手动	照片	●

		状况			
4	下部结构	混凝土墩身、台身、盖梁、台帽及系梁有无开裂、蜂窝、麻面、剥落、露筋、空洞、孔洞、钢筋锈蚀等	航线	照片	●
5		圯工砌体墩身、台身有无砌块破损、剥落、松动、变形、灰缝脱落，砌体泄水孔是否堵塞	航线	照片	○
6		桥台翼墙、侧墙、耳墙有无破损、裂缝、位移、鼓肚、砌体松动	航线	照片	●
7		水位涨落、干湿交替变化处基础有无冲刷磨损、颈缩、露筋，有无开裂，是否受到腐蚀	航线	照片	○
8		锥坡、护坡有无缺陷、冲刷	航线	照片	○
9	桥面系	伸缩缝是否有异常变形、破损、脱落，锚固区有无缺陷	航线	照片	◎
10		人行道有无缺失、破损	航线	照片	○
11		栏杆、护栏有无缺失、破损等	航线	照片	○
12		泄水管、引水槽有无明显缺陷，桥头排水沟功能是否完好	航线	照片	○
13		桥上交通信号、标志、标线、照明设施是否损坏、失效	航线	照片	●
14	附属设施	养护检修设施是否完好；减振、阻尼装置是否完好；墩台防撞设施是否完备；桥上避雷装置是否完好；桥上航空灯、航道灯是否完好，能否保证正常照明；防抛网、声屏障是否完好	航线或手动	照片	●
15	河床及调治构造物	桥位段河床有无明显冲淤或漂流物堵塞现象，有无冲刷及变迁状况，河底铺砌是否完好；调治构造物是否完好，功能是否适用	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					

4.2.4 拱桥上部结构定期检查中可使用无人机的场景及技术要求见下表。拱桥下部结构、桥面系、附属设施、河床及调治构造物的检查可参考梁式桥。

表 4.2.4 无人机拱桥上部结构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	主拱圈是否变形、渗水	航线	照片	○

2	圯工拱桥拱圈的灰缝有无松散、剥离或脱落，砌块有无风化、断裂、压碎、局部掉块、脱落	航线	照片	●
3	空腹拱的腹拱圈有无较大的变形、开裂、错位，立墙或立柱有无倾斜、开裂	航线	照片	○
4	拱的侧墙与主拱圈间有无脱落，侧墙有无鼓凸变形、开裂，实腹拱拱上填料有无沉陷	航线	照片	●
5	拱桥的横向联结有无变位、松动、脱落、断裂、钢筋外露、锈蚀等，连接部钢板有无锈蚀、断裂	航线	照片	○
6	双曲拱桥拱波与拱肋结合处是否开裂、脱开，拱波之间砂浆有无松散、脱落，拱波是否开裂、渗水等	航线	照片	○
7	劲性骨架的拱桥，混凝土是否沿骨架出现纵向或横向裂缝	航线	照片	○
8	吊杆防护套有无开裂、鼓包、破损，吊杆导管端密封减振设施和其他减振装置有无病害及异常等	航线	照片	●
注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机，◎为可采用无人机				

4.2.5 斜拉桥上部结构定期检查中可使用无人机的场景及技术要求见下表。斜拉桥下部结构、桥面系、附属设施、河床及调治构造物的检查可参考梁式桥。

表 4.2.5 无人机斜拉桥上部结构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	桥塔有无异常变位，锚固区是否有开裂、水渍，有无渗水现象，混凝土结构有无缺损、裂缝、剥落、露筋、钢筋锈蚀，钢结构涂装是否粉化、脱落、起泡、开裂，钢结构是否锈蚀、变形、裂缝，螺栓是否缺失、损坏、松动，钢与混凝土连接是否完好	航线	照片	●
2	斜拉索防护套有无开裂、鼓包、破损、老化变质	航线	照片	●
3	锚具是否渗水、锈蚀，是否有锈水流出的痕迹，锚固区是否开裂	航线	照片	○
4	梁体拉索锚固区域的混凝土结构是否开裂、渗水，钢结构是否有锈蚀、渗水	航线	照片	○

5	阻尼器有无异常变形、松动、漏油、螺栓缺失、结构脱漆、锈蚀；桥梁构件气动外形是否发生改变；气动措施和风障是否完好	航线	照片	◎
6	钢主梁检修车轨道、桥面风障、护栏、栏杆的形状及位置是否发生改变	航线	照片	○
注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机，◎为可采用无人机				

4.2.6 悬索桥上部结构定期检查中可使用无人机的场景及技术要求见下表。斜拉桥下部结构、桥面系、附属设施、河床及调治构造物的检查可参考梁式桥。

表 4.2.6 无人机悬索桥上部结构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	桥塔有无异常变位，锚固区是否有开裂、水渍，有无渗水现象，混凝土结构有无缺损、裂缝、剥落、露筋、钢筋锈蚀，钢结构涂装是否粉化、脱落、起泡、开裂，钢结构是否锈蚀、变形、裂缝，螺栓是否缺失、损坏、松动，钢与混凝土连接是否完好	航线	照片	●
2	主缆防护有无老化、开裂、脱落、刮伤、磨损，主缆是否渗水，缠丝有无损伤、锈蚀	航线	照片	●
3	吊索防护套有无裂缝、鼓包、破损，吊索减振装置有无病害及异常等	航线	照片	●
4	吊索锚具是否渗水、锈蚀，是否有锈水流出的痕迹，锚固区是否开裂	航线	照片	○
5	索夹螺栓有无缺失，索夹有无错位、滑移，索夹面漆有无起皮脱落，索夹外观有无裂缝及锈蚀	航线	照片	●
6	锚碇外观有无明显病害，如裂缝、空洞等，锚室顶板、侧墙表面状况是否完好	航线	照片	●
7	桥梁构件气动外形是否发生改变，气动措施和风障是否完好，钢主梁检修车轨道、桥面风障、护栏、栏杆的形状及位置是否发生改变	航线	照片	◎
注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机，◎为可采用无人机				

4.2.7 桥梁特殊检查中可使用无人机的场景及技术要求见下表。

表 4.2.7 无人机桥梁特殊检查场景及技术要求

序号	特殊检查场景	飞行方式	数据采集	适用程度
1	索力测量	航线	视频	◎
2	斜拉索/吊索外观	航线	照片	●
3	索夹滑移	航线	照片	●
4	梁体位移	航线	照片	○

注：●为应采用无人机，○为宜采用无人机，◎为可采用无人机

## 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、桥梁结构及第三方安全。

### 5.2 作业流程

**5.2.1** 无人机桥梁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机构批准，按程序实施飞行作业。

**5.3.2** 航线规划宜符合下列规定：

- 1 航线应覆盖所有巡检目标，并设定合理的数据采集参数。
- 2 桥梁巡检影像采集时应根据巡检对象合理配置相机参数与距离，当需要准确识别裂缝宽度时，图像尺度因子不大于裂缝宽度的 1/3。
- 3 进行桥梁巡检作业时的影像重叠率不小于 10%，确保三维模型重建与图像拼接成功。
- 4 航线编辑完成后核查航线是否存在障碍物遮挡。

**5.3.3** 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。

**5.3.4** 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。

**5.3.5** 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** 无人机与公路桥梁待检部位之间宜保持不小于 3m 的安全距离，确保飞行安全与图像质量。

**5.4.2** 无人机抵近公路桥梁待检部位时，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** 应按照规定进行数据采集。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。单张影像分辨率不低于 1200 万像素。

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，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 无人机起飞前运行识别发送模块功能失效时，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** 飞行活动结束后，按照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，满足公路桥梁技术状况评定、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** 基于预处理后的影像或点云数据，可进行实景三维模型重建。重建后的模型应满足下列要求：

1 完整性与精度：模型应完整覆盖巡检目标，主要结构构件无大面积缺失、变形。模型的平面与高程精度应满足后续量测与分析的工程需求。

2 纹理与轻量化：模型纹理应清晰、色彩真实、无严重拉伸。模型宜进行

轻量化处理，在保证细节的前提下优化数据量，确保能在主流可视化平台中流畅加载与应用

**6.2.3 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 C。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。

## 6.3 巡检成果

**6.3.1 无人机巡检的最终成果**应体系化，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，其中定期检查和特殊检查应提供完整的标准化成果，日常巡查和经常检查可提供简化版成果。成果主要包含巡检报告与规范化数据包。

**6.3.2 巡检报告**是核心成果，应全面反映巡检工作全貌与分析结论。本指南所规定的无人机巡检报告，其内容应作为桥梁定期检查或特殊检查报告的有机组成部分，或作为其重要附件，为桥梁技术状况评定提供客观、精准的数据支撑。巡检报告模板可参照本指南附录 B。

1 定期检查与专项检查报告应包含下列核心内容：

1) 巡检概况：详尽说明任务背景、巡检时间、具体地点、桥梁名称与编号、

作业人员、使用的无人机型号与任务载荷、现场气象与环境条件等。

2) 数据处理方法: 简述所采用的数据处理流程、关键参数及三维模型重建方法等。

3) 病害统计与分析: 以表格、图表等形式, 按桥梁构件、病害类型系统统计病害的数量、面积、长度、宽度等量化信息, 并提供典型病害的影像图示。

4) 病害位置分布图: 应在桥梁正射影像图、二维线形图或三维模型上, 清晰、准确地标注所有识别病害的具体位置和唯一编号, 实现病害的可视化精准定位。

5) 变化趋势分析: 将本次巡检结果与历史巡检数据进行对比, 分析关键病害在尺寸、数量、分布上的变化趋势与发展速率。

6) 结论与建议: 总结桥梁表观技术状况, 其所提供的病害详图、量化数据及发展趋势应作为评定构件或总体技术状况等级的关键依据, 并提出针对性的养护维修建议。

2 日常巡查与经常检查报告可适当简化, 但应包含下列核心内容:

1) 巡检概况: 时间、地点、桥梁基本信息、作业人员与设备。

2) 主要发现: 记录发现的明显病害、异常状况及安全隐患。

3) 初步判断: 对发现问题的严重程度进行初步评估。

4) 处置建议: 提出需要进一步检查或处置的建议。

**6.3.3** 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。

**6.3.4** 交付的成果数据应采用主流、开放或标准化的格式, 确保与既有桥梁养护管理系统、资产管理系统等的兼容且无缝集成。

## 7 安全管理与应急响应

### 7.1 安全管理原则

**7.1.1** 作业单位应按照“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，并制定针对性地控制措施。

**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。在跨越通航河流、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（如桥塔涡流、峡谷风）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：严格按照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，保持与桥梁结

构的安全距离，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，并按照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链接。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桥梁结构，选择无人员、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 本模板适用于公路桥梁定期检查和特殊检查的无人机巡检作业方案编制。日常巡查和经常检查可参照此模板进行简化。

### A.2 方案核心内容

A.2.1 一份完整的无人机巡检方案宜包含以下章节：

#### 1. 任务概况

1.1 巡检目的与依据：明确本次巡检的性质及所依据的技术规范、文件或指令。

1.2 桥梁基本信息：桥梁名称、编号、位置、结构类型、主要尺寸等。

1.3 巡检范围与重点：明确需要检查的桥梁上、下部结构及附属设施的具体范围，并列需要重点关注的构件或已知病害区域。

#### 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、通讯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：桥梁布置图、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 巡检报告模板

### B.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 桥梁基本信息（名称、编号、结构类型、跨径组合等）

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：以表格形式汇总各构件各类病害的数量、规模。

3.2 主要病害与分析：按构件（如桥跨、墩台、支座、桥面系等）分节，详细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：提供在桥梁正射影像或三维模型上标注有病害编号的位置总图。

3.4 趋势分析（适用于定期检查）：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：总结桥梁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、构件、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

## 附录 C 病害智能识别方法

### C.1 病害类型智能识别

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

**C.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，然后采集桥梁病害数据，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 C.1.2。

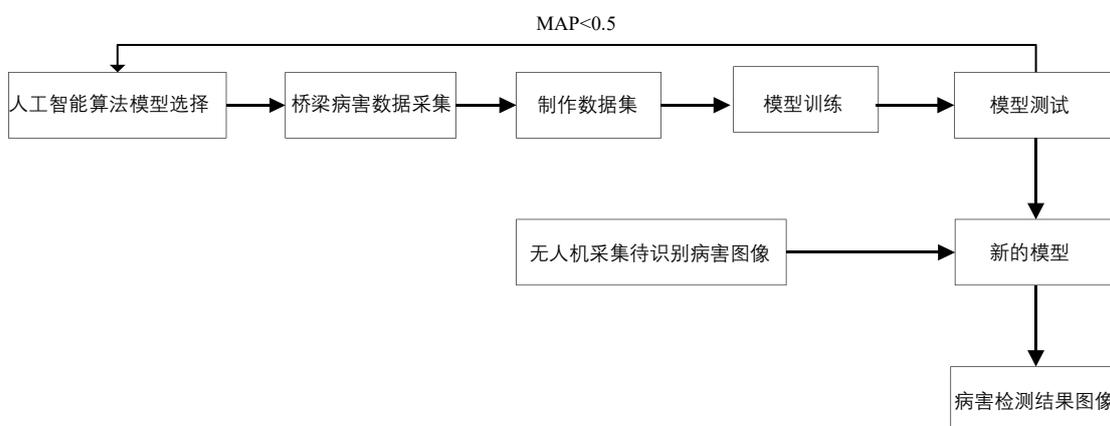


图 C.1.2 病害类型智能识别流程

**C.1.3** 桥梁病害数据集应为基于无人机巡检采集的真实数据。

**C.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。

**C.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。

## C.2 病害参数智能识别

**C.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。

**C.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 C.2.2。

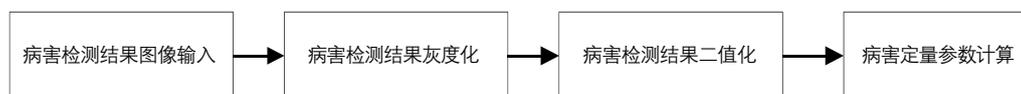


图 C.2.2 病害定量参数智能分析流程

**C.2.3** 病害面积可按式 (C.2.3) 计算：

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

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 ( $\text{mm}^2$ )。

**C.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  $S < s_t$ ，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  $s_t$  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， $s_t$  应取较小值，病害区域较大时， $s_t$  应取较大值。

**C.2.5** 裂缝实际长度可按式 (C.2.5) 计算：

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

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 (mm)

**C.2.6** 若  $L < l_t$ , 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, 式中  $l_t$  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,  $l_t$  应取较小值, 裂缝较长时,  $l_t$  应取较大值。

**C.2.7** 裂缝平均宽度可按式 (C.2.7) 计算:

$$W = \frac{S}{L} \quad (\text{C.2.7})$$

式中:

$W$ ——裂缝实际平均宽度 (mm);

$S$ ——病害面积 (mm<sup>2</sup>);

$L$ ——裂缝实际长度 (mm)。

**C.2.8** 若  $W > w_t$ , 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, 式中  $w_t$  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,  $w_t$  应取较小值, 裂缝较宽时,  $w_t$  应取较大值;

**C.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。

**C.2.10** 单个像素实际面积可按式 (C.2.10) 计算:

$$a = \delta^2 \quad (\text{C.2.10})$$

式中:

$a$ ——单个像素实际面积 (mm<sup>2</sup>);

$\delta$ ——像素标定值 (mm)。