



T/CECS G: XXXX 2025

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

公路工程施工安全管理无人机巡检技
术规程

Technical regulations for UAV Inspection in Highway Construction Safety
Management
(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

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2025 年第一批协会标准制定、修订计划〉的通知》（建标协字〔2025〕22 号）的要求，由浙江金华甬金高速公路有限公司等单位承担《公路工程施工安全管理无人机巡检技术规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

本规程是在广泛调查研究，总结近年来国内无人机公路巡检应用经验，参考国内有关标准，征求有关单位意见，对关键技术进行验证试验，并在开展工程应用的基础上制定的。

本规程由 7 章和 1 个附录组成，主要内容包括：1 总则、2 术语、3 基本规定、4 巡检内容与技术要求、5 数据采集与处理、6 巡检成果与报告、7 安全管理与应急处置，附录 A 无人机平台操作。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，适用本规程相关条文时，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，由浙江金华甬金高速公路有限公司和交通运输部公路科学研究所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），或交通运输部公路科学研究所（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电子邮箱：zm.wang@rioh.cn），以便修订时参考。

主 编 单 位：浙江金华甬金高速公路有限公司

参 编 单 位：交通运输部公路科学研究所

浙江交投高速公路建设管理有限公司

广西路桥工程集团有限公司

主 编：陈魁

主要参编人员：邵社刚、王赵明、吴作铃、王晓卫、孙方永、田雷、纪秋磊

主 审：舒振杰

参与审查人员：

征求意见稿

目 次

1. 总则	1
2. 术语	3
3. 基本规定	5
4. 巡检内容与技术要求	8
4.1 巡检频率与时机	8
4.2 巡检内容	9
4.3 飞行操作技术要求	12
5. 数据采集与处理	18
5.1 一般规定	18
5.2 数据采集	18
5.3 数据处理	19
5.4 智能分析	错误!未定义书签。
5.5 成果管理	20
5.6 质量控制	21
5.7 数据安全	22
6. 巡检成果与报告	24
6.1 一般规定	24
6.2 记录格式	24
6.3 数据存储	25
6.4 成果输出	25
6.5 归档管理	26
7. 安全管理与应急处置	27
7.1 一般规定	27
7.2 飞行作业安全	27
7.3 现场安全管理	28
7.4 应急处置	28
附录 A 无人机平台操作	错误!未定义书签。

A.1 一般规定.....	错误!未定义书签。
A.2 设备与人员要求.....	错误!未定义书签。
A.3 气象要求.....	错误!未定义书签。
A.4 操作方法.....	错误!未定义书签。

征求意见稿

1. 总则

1.0.1 为规范公路工程施工期间无人机安全巡检工作，提升施工安全风险识别、监测与管控水平，保障人员、设备及结构物安全，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路工程（包括新建、改扩建）施工期间的无人机安全巡检工作。

条文说明

公路工程施工环境复杂、作业面动态变化、传统人工巡检存在视野局限、效率偏低、安全风险高等痛点。引入无人机安全巡检技术，旨在通过高空视角、快速覆盖、高精度数据采集等优势，实现对施工区域安全状态与隐患的高效、精准监测。

1.0.3 无人机安全巡检的应用场景包括采用无人机对公路工程施工区域（含路基、路面、桥梁、隧道、涵洞、交安工程、边坡、临时设施、施工便道、驻地、环水保工程、绿化工程及相关附属设施）进行安全状态监测与隐患排查的技术活动。

条文说明

本条明确了本规程的适用边界与应用场景。其适用范围覆盖了公路工程（新建、改扩建）全部施工阶段及几乎所有类型的工程结构物和临时设施。

工程类型：不仅包括路基、路面、桥梁、隧道、涵洞、边坡等永久性主体工程，也涵盖交安工程、绿化工程及相关附属设施。同时，特别将临时设施、施工便道、驻地以及环水保工程纳入其中，体现了对施工现场全面安全管理的需求。

技术活动：聚焦于“安全状态监测与隐患排查”。无人机的应用不仅是简单的影像记录，更侧重于通过定期或专项飞行，识别、评估和预警。边坡失稳迹象、支护结构变形、临时设施违规搭建、作业人员不安全行为、消防通道堵塞、环水保措施不到位、材料堆放隐患等可能引发安全事故的问题，为风险预控和决策提供技术支持。

1.0.4 本规程适用于施工单位、监理单位、建设单位及相关管理单位组织实施的无人机安全巡检工作，规划设计单位和第三方技术服务机构可参照执行。

1.0.5 无人机安全巡检工作除符合本导则的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

征求意见稿

2. 术语

2.0.1 无人机安全巡检 UAV safety inspection

利用无人机搭载的传感器，对施工现场进行定期或不定期的巡视检查，以识别安全隐患、评估安全状态、监控关键风险点的活动。

2.0.2 地面分辨率 Ground sampling distance

影像中两个相邻像素中心投影在地面上的距离。

2.0.3 超视距运行 Beyond visual line of sight

无人机驾驶员无法通过目视直接观察到无人机的运行模式。

2.0.4 仿地飞行 Terrain-following flight

无人机利用传感器保持与地形表面恒定相对高度的飞行技术。

2.0.5 任务载荷 Payload

无人机搭载的用于执行特定任务的设备，如可见光相机、红外热像仪、激光雷达（LiDAR）、多光谱相机等。

2.0.6 喊话警示装置 Loudspeaker warning device

无人机专用设备主要用于通过声音或信号进行警示和广播。

2.0.7 夜间照明装置 Night lighting device

无人机的专用设备主要用于夜间或低光环境下的照明和视觉辅助。

2.0.8 施工关键风险点 Construction key risk point

施工过程中存在较高安全风险，需要重点监控的部位或工序（如高边坡、深基坑、大型结构物吊装区、爆破作业区、临时便道险段、大型设备集中区等）。

2.0.9 无人机巡检成果 UAV inspection deliverables

无人机巡检产生的数据、图像、视频、报告等，简称“巡检成果”。

征求意见稿

3. 基本规定

3.1 巡检对象和模式

3.1.1 公路工程施工无人机安全巡检的对象应包括施工人员、施工设备、施工过程及作业环境等不同场景的不安全因素，具体见附录 A 所示。

3.1.2 公路工程施工无人机安全巡检可根据巡检目的与范围的不同，划分为全面巡查、专项巡查和应急巡查三类工作模式。各类工作模式适用于施工不同阶段的安全管理，其适用关系可按表 3.1.2 确定。

表 3.1.2 无人机巡检工作模式与施工安全管理阶段的适用关系

无人机巡检工作模式	日常安全巡查	高风险作业监控	专项安全巡查	应急响应与调查
全面巡查	●	▲	●	▲
专项巡查	▲	●	●	▲
应急巡查	■	■	■	●

注：● 表示主要适用；▲ 表示根据具体需求可适用；■ 表示不适用。

条文说明

为明确无人机巡检在施工安全管理中的应用场景，本条根据巡检目标的不同，将其划分为三种典型模式：

全面巡查：指对施工区域进行全局性、周期性巡查，主要用于日常安全巡检和阶段性专项检查，旨在全面掌握现场安全状态。

专项巡查：指针对高风险作业或特定施工环节（如爆破、吊装、深基坑开挖等）进行的有针对性、连续性的重点监控。

应急巡查：指在发生安全事故或险情时，快速抵达现场，采集实时信息，支持应急决策与事后调查。

3.2 一般要求

3.2.1 公路工程施工无人机安全巡检系统应由无人机平台、数据采集设备、数据传输系统和数据处理平台组成。优先推荐使用无人机自动机巢或网格化驻点

无人机。

条文说明

公路工程施工无人机安全巡检系统是一个集成化平台。无人机平台负责搭载巡检设备并执行飞行任务；数据采集设备包括高清可见光相机、红外热像仪等，用于获取现场图像、视频及其他传感数据；数据传输系统保障监控数据的实时回传；数据处理平台则对采集的数据进行智能分析，识别安全隐患并生成预警信息。

无人机自动机巢和网格化驻点无人机是当前低空经济中非常成熟的技术方案。可以快速响应：24小时待命，随时可进行任务；高效巡检：无人机可快速抵达故障点，自动完成缺陷识别与数据回传；智能分析：AI算法可对现场情况进行自动判断，并把结果推送到系统平台上进行进一步分析；多机协同：支持多机巢联网管理，实现任务动态分配。

3.2.2 巡检任务中，无人机平台应配备相应的数据采集任务荷载，对施工区域进行全方位数据采集，数据处理模块应对安全隐患进行实时识别、预警与记录。

条文说明

本条明确了无人机安全巡检系统中各组成部分的协作关系。无人机执行飞行任务并采集数据，通过数据传输系统将数据实时发送至地面站或云端，数据处理模块利用图像识别、人工智能算法等技术对安全隐患进行自动识别与分析，并及时发出预警。

3.2.3 开展施工无人机巡检作业时，必须确保施工生产、航空及人员安全。无人机操作人员、设备以及巡检作业本身应符合国家现行空域管理、安全生产等相关法律法规的要求，并制定专门的安全作业手册。

3.2.4 巡检成果应能真实、全面、准确地反映施工现场安全状态，并应能支持安全风险动态评估，作为施工安全管理的决策依据。

3.3 巡检作业要求

3.3.1 公路工程施工无人机安全巡检作业应按规定的程序进行。

1 制定无人机巡检方案，做好巡检准备工作。

2 按照既定方案开展无人机现场飞行作业，进行实时数据传输与处理。

3 针对平台识别并预警的安全隐患，应安排人员进行现场复核和整改，形成整改反馈与复核闭环，并记录隐患详情。

4 编制无人机安全巡检报告。

条文说明

本条规定了推荐的安全巡检工作流程。该流程应体现闭环管理思想，特别是在“安全隐患识别与预警”环节后，应有一个“整改反馈与复核”的闭环，确保隐患得到处理。若识别精度或数据质量不满足要求，应能回溯至数据采集或方案制定环节。

3.3.2 公路工程施工无人机安全巡检作业应符合下列规定：

1 应结合施工组织设计、安全专项方案及现场实际情况，制定科学、详尽的巡检方案；

2 设备选型应综合考虑巡检目标、环境复杂性、实时性要求和精度需求，合理选择无人机平台及任务荷载；

3 应针对施工不同阶段的重大的风险区域和作业点，制定差异化的数据采集策略，确保关键风险源被有效覆盖；

4 数据处理应支持实时或近实时的智能分析，能够自动识别常见安全隐患并生成预警信息；

5 应对巡检结果的有效性和准确性进行判断，若不满足要求应及时调整方案或启动人工复核。

4. 巡检内容与技术要求

4.1 巡检频率与时机

4.1.1 无人机安全巡检应根据工程实际进度、施工风险等级、季节及天气条件等因素制定周期性计划，并应符合下列规定：

1 日常巡检频率不宜低于每日两次；对线路较长的线性工程，可按左、右幅或标段划分，采用每周、每旬或每月的轮巡方式；

2 对高边坡、深基坑、高大模板支架、大型围堰等风险等级较高的工程点位，应增加巡检频次，每日不宜少于一次。

条文说明

本条明确了制定无人机巡检计划应遵循基于风险的动态差异化原则。日常巡检频率不低于每日两次，以适应公路工程复杂多变的环境，及时纠正“违章指挥、违章作业、违反劳动纪律”（以下简称“三违”）行为，实现一般风险常态管控。线性工程或大型项目可采取左右幅或标段轮巡，以优化资源配置。高边坡、深基坑等重大危险源应每日至少巡检一次，体现风险分级管理，确保高风险点位受控。

4.1.2 下列关键工序或特殊工况实施前、中、后，应进行专项巡检或加密巡检：

- 1 爆破作业；
- 2 大型构件吊装；
- 3 深基坑开挖与支护；
- 4 高边坡开挖与支护；
- 5 汛期、台风等极端天气前后。

条文说明

本条规定了需开展专项或加密巡检的重大风险工况，要求实施作业前、中、后全过程监督。作业前重点检查条件验收与准备工作；作业中监控操作规范与环

境稳定；作业后评估安全状态与次生隐患。极端天气前后也需加强巡检，突出无人机在防灾预警和灾后评估中的作用。

4.1.3 现场发生险情、安全事故或接到重大安全隐患报告后，应立即启动应急巡检。无人机自动机巢可在 5 分钟内启动应急巡检并实时上报进展。

条文说明

本条建立了应急状态下无人机即时响应机制。发生险情或事故时应立即启动应急巡检，利用无人机快速响应、视角独特和地形无障碍的优势，为指挥决策提供实时现场信息，定位事故点、评估灾情、监测次生风险及勘察救援通道，提升救援效率与安全性，嵌入应急管理体系成为关键环节。

4.1.4 气象要求

1 下列气象条件下，严禁驾驶无人机：

- 1) 雷暴天气；
- 2) 大风天气；
- 3) 低能见度。

2 下列气象条件下，应根据无人机具备的抗雨（IP45/IP55）和夜视能力，全地在恶劣环境下飞行：

- 1) 阵风风速超过 10m/s 天气；
- 2) 能见度小于 300m；
- 3) 低温环境，注意电池保温；
- 4) 高原飞行，首先要空载试飞，进行飞行机动检查后，再全载荷试

飞。

3 在获取高精度数字图像时，无人机的抗风能力宜大于 4 级。

4 紧急飞行要求，必须使用具备 IP55 防护等级的工业级无人机，配备红外热成像、夜航灯及探照灯的前提下进行夜间应急搜救；制定恶劣天气下的双机组作业制（一人操作，一人观察气象与环境），并建立“损毁免责”机制，鼓励在保障人员安全的前提下使用无人机进行灾情侦察。

4.2 巡检内容

4.2.1 路基路面工程巡检应包括以下内容：

表 4.2.1 路基路面工程巡检内容

序号	巡检内容
1	路基范围内场地布置、材料堆放、排水系统设置与通畅情况
2	路面、路肩是否存在裂缝、沉陷、坑洞、错台等病害及范围
3	路堑边坡坡面稳定性，是否存在冲刷、坍塌、滑坡等迹象
4	截水沟、排水沟、急流槽等排水设施是否完好、畅通
5	坡面防护及支挡结构是否破损、失稳
6	浮石清理、植被状态及被动防护网等设施状况

条文说明

本条规定了路基路面工程无人机巡检的核心内容。重点在于通过空中视角，全面监控施工区域的整体安全状态与实体质量。巡检内容覆盖从宏观的场地布置、排水通畅性，到具体的路面病害、边坡稳定性和防护设施有效性，旨在及时发现因施工扰动、水土作用或养护不足引发的各类隐患，实现对工程本体安全风险的前端识别与动态控制。

4.2.2 桥梁工程巡检应包括以下内容：

表 4.2.2 桥梁工程巡检内容

序号	巡检内容
1	桩基施工孔口防护、钻机支腿稳固情况及作业区封闭警示
2	墩台基坑支护完整性、上下通道及作业平台安全性
3	支架、满堂架是否发生变形或沉降
4	起重吊装设备操作规范性及作业区域封闭管理
5	高空作业人员安全防护措施落实情况
6	桥面临边、孔洞防护及挂篮等施工平台合规性

条文说明

本条规定了桥梁工程无人机巡检的针对性内容。桥梁施工工艺复杂、安全风险高，特别是高空、临边、起重吊装等作业环节。巡检聚焦于施工条件的安全性（如孔口防护、基坑支护）、临时结构稳定性（如支架、挂篮）、设备操作规范性以及人员防护措施落实情况，利用无人机优势近距离检查人眼难以到达的部位，为高风险作业提供实时监督与安全保障。

4.2.3 隧道及涵洞工程巡检应包括以下内容：

表 4.2.3 隧道及涵洞工程巡检内容

序号	巡检内容
1	洞口边坡稳定性

2	洞身开挖面超欠挖、掉块及支护状态
3	洞内通风、照明及排水状况
4	涵洞基坑开挖、结构安装及回填质量

条文说明

本条规定了隧道及涵洞工程无人机巡检的特殊性内容。地下与半地下施工环境隐蔽、风险集中，巡检需关注围岩与支护体系的稳定性、洞内安全作业环境以及关键工序质量。通过无人机快速核查洞口边仰坡、洞内开挖面、支护状态及内部环境，有效补充地面检查的不足，提升对隐蔽工程风险的掌控能力。

4.2.4 临时设施巡检应包括以下内容：

表 4.2.4 临时设施巡检内容

序号	巡检内容
1	施工围蔽、交通导改及警示标志设置规范性
2	“两区三厂”、施工便道、栈桥、临时码头等大临设施边界合规性与结构安全
3	施工便道路面状况及临水临崖路段防护
4	驻地、拌合站、预制场等区域的消防与排水设施
5	取、弃土场挡护结构稳定性及排水系统有效性

条文说明

本条规定了临时设施巡检的要点。临时设施是保障施工安全的基础环境，但其合规性与安全性常被忽视。巡检内容强调其对内外部安全的影响，包括边界隔离、结构稳固、交通安全以及消防排水等设施的设置与运行状态，旨在预防因临时设施缺陷导致的安全事故或效率损失。

4.2.5 通用设施与人员行为巡检应包括以下内容：

表 4.2.5 通用设施与人员行为巡检内容

序号	巡检内容
1	施工配电箱设置及电缆敷设规范性
2	大型施工机械（塔吊、龙门吊等）基础稳固与安全距离
3	施工人员安全防护用品佩戴情况
4	人员违规进入危险区域、施工车辆违规行驶等行为
5	车辆是否违规载人

条文说明

本条规定了通用设施与人员行为的巡检内容。施工用电、大型设备、人员行

为是现场安全管理的通用重点，也是“三违”现象高发领域。无人机巡检可高效覆盖广大区域，客观记录设备设置、电缆敷设、安全距离以及人员防护用品佩戴、违规操作等情况，为纠正不安全行为和状态提供直观依据。

4.2.6 临近既有高速公路施工时，巡检还应包括：

表 4.2.6 通用设施与人员行为巡检内容

序号	巡检内容
1	隔离栅、标志标牌等交安设施完好状况
2	人员违规横穿、隔离设施（铁马、水马）倒伏情况
3	施工活动是否对既有路产造成侵害

条文说明

本条规定了临近既有高速公路施工的特殊巡检要求。此类作业直接关系到既有高速公路的运营安全，风险外溢性强。巡检除关注常规施工内容外，重点增加了对交安设施完好性、隔离设施有效性及路产保护情况的监控，严防施工活动对既有交通造成干扰或侵害。

4.2.7 环境保护巡检应包括以下内容：

表 4.2.7 环境保护巡检内容

序号	巡检内容
1	是否占用耕地、基本农田或破坏保护性植物
2	施工堆土苫盖及固体废弃物处置情况
3	环保设施及标识系统有效性
4	施工废水排放、沉淀池的情况
5	洒水降尘设备的布设及运行情况，料场覆盖、运输车辆密闭情况
6	弃土场、取土场的防护措施（如挡墙、截排水设施）及水土流失等
7	对红线内外植被的破坏情况

条文说明

本条规定了环境保护巡检的内容。旨在利用无人机视野广阔、巡查高效的特点，对施工活动的生态环境影响进行监控，重点关注非法占地、植被破坏、水土流失及固体废弃物处置等问题，督促落实环保措施，履行环境保护责任。

4.3 飞行操作技术要求

4.3.1 飞行前应依据检查清单对无人机平台、任务载荷、电池、通信链路及地面站系统进行全面检查，并记录检查结果。

条文说明

本条明确了飞行前准备的强制性要求。执行全面检查是确保飞行安全与任务成功的首要前提，其核心在于通过标准化、清单化的流程，系统性排除无人机系统自身可能存在的设备故障与安全隐患，并将检查结果记录在案，形成可追溯的质量控制闭环。

4.3.2 起降场地应选择地势平坦、开阔、远离人员及障碍物的区域，必要时设置临时起降坪并警戒。现场宜具备通电通网条件。

条文说明

本条规定了起降场地的选择标准。安全、可靠的起降是飞行作业的基础。要求场地平坦开阔并远离干扰，旨在最大限度降低起降阶段(事故高发期)的风险。设置临时起降坪与警戒线是主动的风险隔离措施，而通电通网条件则为设备续航与数据实时回传提供了便利。

4.3.3 飞行高度与速度应综合考虑安全要求、数据采集精度与作业效率确定，并应符合下列规定：

1 飞行高度应避免在人员、设备及敏感设施上空过低飞行，高度限制为 120m，经审批后可调整；最小飞行高度根据场景实际情况确定。

2 巡航速度宜控制在 10-15m/s 范围内，可根据航线模式（蛙跳、折返）适当调整。通道巡查速度宜 $\leq 10\text{m/s}$ ；精细化巡查速度宜 $\leq 2\text{m/s}$ ；重点隐患确认应采用悬停拍摄。

条文说明

本条确立了飞行高度与速度的设定原则。飞行参数的设定需在安全、精度与效率三者间取得平衡。禁止在敏感目标上空过低飞行是出于安全伦理和隐私考虑，120m 的限高是遵守空域管理的基本要求。10-15m/s 的巡航速度是基于常见多旋翼无人机性能、影像采集清晰度与巡检效率综合确定的经验值。巡航速度为 15m/s 速度过快，会导致严重的运动模糊，无法识别微小隐患。

4.3.4 航线规划应优先采用自动航线，并满足以下要求：

- 1 确保覆盖目标区域且无重复遗漏；
- 2 规避禁飞区、障碍物及强干扰源；
- 3 根据无人机续航能力合理划分航线段；

条文说明

本条提出了航线规划的核心准则。优先采用自动航线能提升作业标准化程度与效率，降低人为操作误差。要求的四点内容构成了航线规划的安全与技术框架：覆盖性是根本目的，避障避限是安全红线，续航匹配是可行性基础，而对高风险点进行精细航线规划则体现了风险分级管理的原则。

4.3.5 巡检拍摄时变焦倍数不宜低于 7 倍，俯拍角度宜保持在 30°~40°。

条文说明

本条明确了拍摄的两项关键技术参数。规定 7 倍以上变焦是为了确保能够从安全距离外清晰辨识地面细节（如裂缝、螺栓）；推荐 30°~40°的俯拍角度是基于工程实践的最佳折衷，既能获得具有良好立体感的影像利于判断变形，又能有效避免镜头被垂直物体（如桥墩）遮挡。

4.3.6 数据采集应确保分辨率、重叠率及拍摄角度满足后续智能识别与分析要求，对重点隐患部位应进行多角度、近距离拍摄。数据分辨率宜为厘米级，用于三维实景建模航向重叠率宜大于 80%，旁向重叠率宜大于 70%，拍摄角度宜根据现场情势能精准拍摄隐患为准。

条文说明

本条强调了数据采集的质量要求。采集的数据需满足后续 AI 识别与分析的输入标准，否则飞行作业将失去价值。规定的分辨率、重叠率是进行高质量二维正射影像与三维实景建模的基础技术要求，而对重点部位进行多角度、近距离拍摄，是为隐患精准研判与定量分析提供多维度数据支撑。

4.4 巡航方式

4.4.1 无人机宜采用自动航线飞行与定点巡检相结合方式，确保巡检范围覆盖无遗漏。

4.5 无人机定位精度要求

4.5.1 无人机平台应具备高精度定位与姿态测量能力，以确保巡检数据的空间精度和可比性。宜选用具备 RTK（实时动态差分定位）或 PPK（后处理动态定位）功能的无人机系统，并确保定位精度优于 $\pm 5\text{cm}$ 。在 GNSS 信号受限环境中，应采用视觉惯性组合导航（VIO/VINS）、激光雷达里程计（LIO）或地标定位等替代方案，维持空间定位连续性与稳定性。

4.6 操作人员及操作方法

4.6.1 操作人员应熟练掌握失控返航、紧急降落、通信中断处置等应急操作；飞行中应主动避让有人驾驶航空器及地面目标，并礼让地面人员、车辆和设备。

条文说明

本条要求操作员掌握应急程序。应急操作能力是保障人、机和环境安全的最后防线。熟练掌握失控返航、紧急降落等程序，意味着在突发情况下操作员能迅速、正确地介入，将事故损失降至最低，这是从“常规操作”迈向“安全操作”的关键标志。确立了空中与地面的避让原则。主动避让有人航空器是空域使用中必须严格遵守的安全底线和法律要求。礼让地面人员与设备则体现了安全作业的人文关怀与社会责任，明确了无人机作为作业工具，其运行必须服从于整体施工安全的大局。

4.6.2 操作方法

1 无人机平台获取视频数据时应保持飞行的稳定性，获取数字图像时应保持悬停的稳定性。

2 无人机平台悬停时的飞行姿态控制稳度宜满足下列要求：横滚角 $< \pm 3^\circ$ ；俯仰角 $< \pm 3^\circ$ 。

3 无人机平台悬停时的飞行航线控制稳度宜满足下列要求：偏航距 $< \pm 0.5\text{m}$ ；航高差 $< \pm 0.5\text{m}$ ；航迹弯曲度 $< \pm 5^\circ$ 。

4.7 差异化飞行场景要求

4.7.1 无人机巡检应根据作业场景分为平面、立面及空间三类。

——平面作业（路基、路面）：根据 GSD 需求动态调整。若使用广角相机，

人员行为监测航高宜 $\leq 20\text{m}$ ；若使用高倍变焦相机，航高可适当提升，但需确保 GSD 优于 1cm/pixel 。

——立面作业（桥墩、边坡）：宜采用正视悬停方式，距目标 $2\text{--}5\text{m}$ ，俯仰角 -45° 到 45° ；

——空间作业（桥下、隧道、涵洞）：应采用机载补光与避障系统，姿态稳定角偏差 $\leq \pm 3^\circ$ 。

4.7.2 对于空间受限、光照不足或 GNSS 信号受遮挡的作业场所，应采用视觉惯性组合导航（VIO/VINS）、激光雷达、光流导航或地标定位等非卫星导航手段建立局部坐标系，确保飞行控制与数据空间精度。

4.7.3 在无 GNSS 和 GNSS 信号受遮蔽环境中，应设立人工观察点或地面标志点辅助定位，并启用“失联保护”模式，自动执行悬停或原路返航。

4.7.4 无人机巡检任务应随施工阶段动态调整航线、视角与覆盖范围，确保关键节点（开挖、浇筑、吊装、回填等）均有完整影像记录。

4.8 无人机选型的要求

4.8.1 优先选择具备高精度悬停、多传感器适配、长续航和智能分析能力的无人机，能显著提升安全巡检效率。

1 悬停精度为厘米级（ ± 1 厘米），稳定拍摄，避免图像模糊。

2 传感器可搭配红外热成像查内部空鼓，激光雷达测形变，多光谱相机评估结构健康。

3 续航时间建议单次飞行 ≥ 30 分钟，无 GPS 环境需强抗风能力。多备电池与快充，确保全天作业不中断。

4 鼓励推荐 AI 识别自动分析，支持三维建模后自动生成巡检路径断点续飞不重复，4G/5G 或 WiFi 传数据，云端分析。

5 应急作业必须使用具备相应 IP 防护等级 IP54 以上的工业级无人机。

征求意见稿

5. 数据采集与处理

5.1 一般规定

5.1.1 公路工程施工无人机安全巡检数据管理应建立全生命周期管理体系，涵盖数据采集、传输、存储、处理、分析及归档等环节，确保数据的规范性、准确性和安全性。

5.1.2 应建立专门的数据管理制度，明确数据管理责任人，建立分级授权机制和操作日志追踪制度。

5.1.3 数据管理应覆盖原始数据、处理过程数据和成果数据，所有数据均需记录采集时间、位置、设备及操作人员等关键元数据。

5.1.4 数据采集完成后应及时进行备份，重要数据应进行多副本异地备份，建议采用“本地 + 云端”双通道策略；数据存储格式宜采用通用开放格式（如 JPEG、MP4、LAS、CSV、JSON 等）。

5.1.5 应优先采用通用或开放格式进行数据存储和交换，确保数据的长期可读性和兼容性。

5.1.6 数据采集、处理及存储的全过程应符合《GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》及相关保密管理规定。

条文说明

数据管理是无人机安全巡检工作的基础。建立全流程的数据管理体系，明确管理责任和规范要求，是确保数据有效利用的前提。统一的数据格式和存储结构有利于数据的长期保存和共享利用。

5.2 数据采集

5.2.1 数据采集前应根据巡检目标和对象制定详细的采集方案，明确采集内容、精度要求、设备参数和飞行规划。

5.2.2 数据采集应覆盖施工全过程，包括但不限于以下内容：

- 1 施工人员安全行为；
- 2 施工机械设备安全状态；
- 3 临时设施安全状况；
- 4 作业环境安全条件；
- 5 重点部位和关键工序安全监控。

5.2.3 应依据施工计划及现场进展动态调整无人机飞行航线与作业区域，确保数据采集的时效性和覆盖完整性。

5.2.4 采集过程中应实时监控数据质量，对不符合要求的数据应及时进行补采或重采。

5.2.5 原始数据应按统一规则进行命名和存储，推荐采用"项目编号_采集日期_数据类型_序列号"的方式命名。

5.2.6 现场应进行数据初步质量检查，包括但不限于：数据完整性、清晰度、覆盖范围等，并填写数据采集质量记录表。

条文说明

规范化的数据采集是保证后续处理和应用效果的基础。通过制定详细的采集方案和质量控制措施，确保采集的数据满足后续处理和分析的要求。

5.3 数据处理

5.3.1 数据处理前应制定处理方案，明确处理流程、质量要求和输出成果格式。

5.3.2 影像数据处理应符合下列要求：

- 1 应采用 ENVI、ERDAS Imagine 或 PCI Geomatica 等专业软件进行图像处理和数据分析；
- 2 应进行图像增强和特征提取，提高数据可用性；
- 3 应对重点部位和关键工序进行专项处理和分析。

5.3.3 视频数据处理应符合下列要求：

- 1 应进行视频摘要和关键帧提取，提高处理效率；
- 2 应对异常行为和安全事件进行自动检测和报警；
- 3 应建立视频数据与空间位置的关联关系。

5.3.4 多源数据融合处理应符合下列要求：

- 1 应统一空间参考基准，确保数据空间一致性；
- 2 应保留各数据源的特征优势，实现信息互补；
- 3 融合结果应进行精度验证，确保可靠性。

5.3.5 数据处理过程中应记录关键参数和处理日志，保证处理过程可重现、结果可验证。

5.3.6 处理成果应进行质量检查，包括空间精度、属性精度、逻辑一致性等方面的验证。

条文说明

数据处理是将原始数据转化为有用信息的关键环节。通过规范化的处理流程和质量控制，确保数据处理成果的准确性和可靠性。

5.4 智能分析

5.4.1 鼓励采用人工智能、计算机视觉等技术对巡检数据进行智能分析，实现对人员不安全行为、设备异常、结构变形、环境风险等的自动识别与预警。

5.4.2 智能分析应包括但不限于以下内容：

- 1 人员不安全行为（未佩戴防护装备、违规入区等）；
- 2 设备不安全状态（起重超限、临边防护缺失等）；
- 3 施工材料摆放状态，模版钢筋堆放；
- 4 环境不安全因素（高边坡滑移、支架沉降变形、积水、火情等）；

5 施工工序异常及安全隐患演变趋势。

5.4.3 智能分析算法应定期进行优化和更新，提高识别准确率和效率。智能识别的准确率宜不低于 80%，误报率不应高于 5%。系统应具备人工校核与结果修正机制，形成“识别—校核—反馈—优化”的闭环流程。智能识别模型应通过持续的数据积累与样本学习不断提升性能；经人工校核修正的数据应及时汇总整理，并反馈至算法开发与训练环节，用于模型再训练和数据完善。

5.4.4 分析结果及生成的预警信息，并推送到相关管理人员。

条文说明

智能分析是提高巡检效能的关键。通过采用先进的人工智能技术，可以实现安全风险的自动识别和预警，提高安全管理的效率和水平。

5.5 数据管理

5.5.1 应建立统一的成果管理体系，规范成果数据的格式、内容和质量要求。

5.5.2 成果数据应包括但不限于以下内容：

- 1 巡检报告；
- 2 安全隐患清单；
- 3 整改通知单；
- 4 验收记录。

5.5.3 成果数据应及时归档，并建立完善的检索和查询机制。

5.5.4 应定期对成果数据进行汇总和分析，为安全管理决策提供支持。

条文说明

成果管理是确保巡检工作有效性的重要环节。通过建立规范的成果管理体系，可以保证巡检成果的有效利用和持续改进。

5.6 质量控制

5.6.1 应建立完善的质量控制体系，对数据采集和处理各环节进行质量检查。

5.6.2 数据采集质量检查应包括以下内容：

- 1 数据完整性检查；
- 2 空间精度验证；
- 3 图像质量评估；
- 4 覆盖范围检查。

5.6.3 数据处理质量检查应包括以下内容：

- 1 处理精度验证；
- 2 逻辑一致性检查；
- 3 成果完整性检查；
- 4 格式规范性检查。

5.6.4 应定期对数据处理软件和算法进行验证和评估，确保其处理效果满足要求。

5.6.5 应建立质量问题反馈和整改机制，对发现的质量问题及时进行处理。

条文说明

质量控制是保证数据质量的重要措施。建立完善的质量控制体系，可以对数据采集和处理各环节进行有效监控。

5.7 数据安全

5.7.1 应建立数据安全管理制度，采取有效措施防止数据泄露、篡改和丢失。

5.7.2 敏感数据应进行加密存储和传输，访问权限应进行严格管控。

5.7.3 数据归档应按照规定执行，确保数据的长期保存和可读取性。

5.7.4 应定期对存储数据进行安全检查，及时发现和处理安全隐患。

条文说明

数据安全是数据管理的重要环节。完善的安全措施可以保护数据不被非法获取

和篡改，确保数据的机密性、完整性和可用性。

征求意见稿

6. 巡检报告

6.1 一般规定

6.1.1 无人机安全巡检应真实、准确、全面地反映施工现场安全状况，客观记录发现的安全隐患和违规行为。

6.1.2 巡检成果的记录与表达应由具备相应资质的专业人员完成，确保术语使用规范、表述准确清晰。

6.1.3 巡检数据处理各阶段的成果应按照统一规范的格式进行整理、提交和归档保存。

条文说明

无人机安全巡检成果的真实性和准确性直接关系到施工安全管理的有效性。专业人员采用规范术语进行记录和表达，有助于确保信息的准确传递和理解。统一格式的成果整理有利于提高工作效率，便于后续查询和应用。

6.2 记录格式

6.2.1 无人机巡检产生的各类数据，包括原始数据及各阶段处理成果，应采用统一的规则进行记录和管理。

6.2.2 数据存储应选择通用性强、兼容性好的文件格式，确保数据的长期可读性和跨平台使用。

6.2.3 影像数据应以 JPEG、PNG 等通用格式存储，保留完整的 EXIF 信息。

6.2.4 视频数据应采用 MP4、AVI 等标准格式存储，确保播放兼容性。

6.2.5 点云数据宜采用 LAS、PCD 等开放格式存储。

6.2.6 巡检日志、检测报告等文本数据应采用 PDF、DOCX 等格式保存。

6.2.7 结构化数据宜采用 JSON、XML 或 CSV 格式存储，便于数据处理和分析。

条文说明

统一规范的记录格式有利于数据的长期保存和共享利用。选择通用性强、兼容性好的文件格式可以避免因软件升级或系统更换导致的数据无法读取问题，确保数据的长期可用性。

6.3 数据存储

6.3.1 无人机巡检采集的原始数据及各阶段处理成果均应存储在安全可靠的系统中，包括本地服务器和云端存储，并实施异地备份策略。

6.3.2 存储系统应设置严格的访问控制机制，确保只有授权人员可以访问相应数据。

6.3.3 应定期评估存储容量使用情况，根据数据增长趋势及时扩充存储资源。

6.3.4 应建立数据访问审计制度，定期审查数据使用情况，防范数据泄露风险。

条文说明

安全可靠的数据存储是保证巡检成果有效性的基础。多重备份策略可以防止数据丢失，严格的访问控制可以保护数据安全。定期评估存储需求和使用情况，可以确存储资源的充足和有效利用。

6.4 成果输出

6.4.1 巡检成果输出应包括但不限于以下内容：

- 1 安全隐患清单及描述；
- 2 违规行为记录及影像证据；
- 3 整改建议与处置要求；
- 4 复查结果与验证材料。

6.4.2 成果输出的详细程度与形式应与巡检项目的相匹配。

- 1 对于日常巡检，应输出巡检简报；
- 2 对于专项或应急巡检，应输出完整的巡检报告与分析数据。

6.4.3 巡检报告宜包括以下主要内容：

- 1 基本信息（项目名称、时间、区域、设备型号）；
- 2 巡检方法与数据来源；
- 3 主要发现（含隐患编号、位置、严重程度）；
- 4 整改与复查建议；
- 5 附件（图片、视频、点云文件、日志）。

6.4.4 成果文件应具备良好的兼容性，可在常见办公、可视化及安全管理平台中直接读取和展示。

6.4.5 巡检成果应经编制、复核、审批三级审查流程后方可发布或归档。

6.4.6 巡检结果及整改复查数据应回传至施工安全管理系统，形成“巡检—整改—复查—反馈”闭环。

条文说明

巡检成果的输出应满足不同层级管理人员的需求。日常巡检简报侧重及时性，专项检测报告强调深度分析，应急报告注重快速响应。成果的兼容性有利于实现数据的共享和综合利用，提高安全管理效率。

6.5 档案管理

6.5.1 巡检成果应进行系统化归档，长期保存。归档资料应包括：

- 1 原始数据：所有采集的影像、视频、点云等原始数据；
- 2 过程文件：巡检方案、飞行记录、处理参数等过程文档；
- 3 成果数据：隐患清单、检测报告、整改通知等成果文件；
- 4 交付物：提交给委托方的所有电子和纸质文件。

6.5.2 归档数据应建立完善的检索机制，便于查询和利用。

6.5.3 应定期对归档数据进行检查和维护，确保数据的完整性和可用性。

条文说明

系统化的档案管理有利于巡检成果的长期保存和有效利用。完整的归档资料可以为安全事故调查、责任认定提供证据支持，也为安全管理改进提供历史数据参考。定期检查和维护可以确保归档数据的质量和可用性。

7. 安全管理与应急处置

7.1 一般规定

7.1.1 无人机操作人员必须经过专业培训并取得相应资格证书，熟悉设备性能和操作规程。

7.1.2 应制定相应的安全措施和应急预案。

7.1.3 每次作业前应进行安全风险评估。

条文说明

明确无人机巡检作业的安全管理基本原则。资质要求和培训是确保作业安全的基础，事前风险评估有助于识别潜在危险并采取预防措施，为安全作业提供制度保障。

7.2 飞行作业安全

7.2.1 飞行前应对无人机及任务载荷进行全面检查，确认动力系统、控制系统、通信链路、导航系统、电池状态均正常。

7.2.2 无人机飞行作业应避开人员密集区、交通干线、变电设施、加油站及其他重要建筑物。

7.2.3 当气象条件恶劣（如雷暴、大风、低温、高湿或能见度低于 300 m）或电磁干扰严重时，应暂停作业。风速超过 10m/s 时不宜飞行(以无人机遥测回传的空中风速为准，而非仅参考地面)。在海拔 3000 米以上区域，应选用经高海拔性能认证的机型，并相应降低最大载重和飞行时间预期。

7.2.4 飞行作业应设置安全警戒区，警戒半径宜不小于起降点水平距离的1.5倍，安排专人值守并保持通信畅通。

7.2.5 多机协同作业时，应建立统一的飞行协调机制，明确各无人机的航高、任务范围及通信频段，防止信号干扰与航迹重叠。

7.2.6 作业全程应实时监控飞行状态，必要时设置地面观察员协助监视周边环境变化。

条文说明

规定飞行作业过程中的具体安全要求。设备检查是安全飞行的基础，环境评估和警戒设置是防止意外事故的重要措施，多机协同作业需要专门的协调机制以确保飞行安全。

7.3 现场安全管理

7.3.1 现场作业人员应配备必要的个人防护装备，遵守施工现场安全管理规定。

7.3.2 起降场地应平整坚实，远离障碍物，并设置明显标识。

7.3.3 设备运输和存放应采取防震、防潮、防火措施。

7.3.4 电池应单独存放，避免高温、潮湿环境，定期检查状态。

条文说明

规范现场作业的安全管理要求。个人防护和现场管理是保障作业人员安全的重要措施，设备管理和电池安全是防止意外事故发生的关键环节。

7.4 应急处置

7.4.1 应制定无人机失控、坠落、碰撞等突发事件的应急预案。

7.4.2 发生险情时应立即启动应急预案，采取紧急措施控制事态发展。

7.4.3 出现设备故障或飞行异常时，应首先确保人员安全，必要时启动自动返航或紧急降落。

7.4.4 发生事故时应立即报告，保护现场，配合调查处理。

7.4.5 应定期组织应急演练，提高应急处置能力。

条文说明

建立完善的应急处置机制。应急预案和应急演练是提高应对突发事件能力的重要措施，事故报告和调查处理是总结经验、改进工作的重要环节。

7.5 特殊环境飞行安全要求

7.5.1 在 GNSS 信号弱或无信号环境（桥下、隧道、密林等）进行飞行作业时，应采用视觉惯性导航系统或地标定位技术，确保飞行安全与数据空间一致性。

7.5.2 无人机立面或空间飞行时，应保持安全距离 $\geq 2\text{ m}$ 且 $\leq 4\text{ m}$ ，与结构物表面夹角 $30^\circ\text{--}45^\circ$ 。当环境光照不足时，应使用补光装置，并校核影像曝光稳定性。

7.5.3 对于强电磁或粉尘、高温、高湿环境，应进行设备防护评估；必要时使用防爆型或防尘防水等级 IP54 及以上设备。

7.5.4 在复杂环境飞行时，应配置双重通信链路（主链 + 备份链），确保遥控与数据传输稳定；通信中断超过 3s 应自动执行悬停或返航程序。

附录 A 无人机安全巡检的对象

附录 A 无人机安全巡检的对象列表

序号	类别	巡检对象
1	施工人员的不安全行为	未佩戴安全防护用品
		违规操作
		进入危险区域
2	施工设备及设施的不安全状态	设备倾覆
		支架变形
		安全设施缺损
3	作业环境的不安全因素	边坡失稳
		基坑积水
		场地杂乱
		火灾隐患
4	施工过程的重大风险作业	高空作业
		爆破作业
		大型构件吊装