

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CASME

团 体 标 准

T/CASME XXXX—2026

隧道巡检用无人机技术规范

Technical specification for tunnel inspection unmanned aerial vehicles

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国中小商业企业协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统架构与组成	1
5 技术要求	2
6 作业流程规范	4
7 数据管理与分析	7
8 维护与保养	8
9 安全要求	9
附录 A（资料性） 隧道巡检作业流程图	11
附录 B（资料性） 无人机巡检设备检查清单	12
附录 C（资料性） 隧道无人机智能巡检内容	13

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国中小商业企业协会提出并归口。

本文件起草单位： 。

本文件主要起草人： 。

隧道巡检用无人机技术规范

1 范围

本标准规定了隧道巡检用无人机系统（包括无人机平台、任务载荷、地面站及通信系统）的技术要求、作业流程、数据管理与分析、维护保养以及安全要求等内容。

本标准适用于公路、铁路、市政等交通隧道及水利、能源等领域涵洞、巷道基础设施巡检所用无人机系统的设计、制造、检验、作业操作与维护管理。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 38909 民用轻小型无人机系统电磁兼容性要求与试验方法
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- T/CITS 367 人机集群智能协同检测系统通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

隧道巡检 tunnel inspection

利用无人机等设备对隧道结构外观状态（如衬砌、路面、轨道、接触网、排水设施等）进行数据采集、检测与评估的作业活动。

3.2

隧道巡检无人机系统 unmanned Aerial Vehicle System for Tunnel Inspection

专用于隧道封闭、半封闭空间内执行巡检任务的无人机平台、任务载荷、通信链路及地面控制站的统称。

3.3

拒止环境导航 navigation in a denial-of-service environment

在全球卫星导航系统（GNSS）信号缺失或微弱的隧道内部，无人机利用视觉、激光、超宽带（UWB）等技术进行自主定位与导航的能力。

3.4

协同巡检 collaborative Inspection

多架无人机之间或无人机与其它巡检设备之间，按照既定策略进行任务分配、路径规划与协同作业的模式。

4 系统架构与组成

4.1 系统总体架构

4.1.1 隧道巡检用无人机系统采用“采集—传输—控制—分析”四层架构，各层协同工作。采集层由无人机平台及任务载荷构成，负责隧道数据采集。

4.1.2 传输层依托通信网络，实现采集数据与控制指令的双向传输。

4.1.3 控制层通过地面控制系统，完成无人机飞行控制、航线规划及状态监控。

4.1.4 分析层对采集数据进行处理、缺陷识别与报告生成，支撑隧道巡检评估。

4.1.5 多设备协同作业逻辑符合 T/CITS 367。

4.2 无人机平台

4.2.1 作为巡检任务的执行载体，需满足隧道特殊环境作业需求。采用高强度轻量化材料（如碳纤维复合材料），具备抗振、抗冲击性能；机身需做防水、防尘、防腐处理，关键部件（电机、飞控）需具有更高防护等级，适应隧道潮湿、多尘环境。

4.2.2 机身尺寸应适配隧道狭窄空间，折叠后最大尺寸不超过 800 mm×600 mm×300 mm；最大起飞重量不超过 15 kg（含载荷），便于运输及隧道内灵活操作。

4.3 任务载荷

4.3.1 载荷

4.3.1.1 实现隧道缺陷检测与环境监测的核心组件，需满足多维度巡检需求，支持多载荷同时挂载，总载荷重量≤5 kg。

4.3.1.2 载荷接口采用标准化设计（如 DJI Ronin 接口），更换载荷时间≤10 min，适配不同巡检场景需求。

4.3.1.3 主要包括可见光相机、红外热像仪、激光雷达、气体传感器、强光照明系统等。

4.3.2 任务

4.3.2.1 可见光相机：用于衬砌裂缝、剥落、渗漏水等外观缺陷识别。

4.3.2.2 红外热像仪：用于衬砌内部空洞、钢筋锈蚀、电气设备发热检测。

4.3.2.3 激光雷达：用于隧道净空测量、衬砌收敛变形分析、三维建模。

4.3.2.4 气体传感器：用于隧道内有害气体浓度监测，超标时自动报警。

4.3.2.5 强光照明系统：用于隧道低光照区域补光，确保可见光图像清晰。

4.4 地面控制系统

4.4.1 承担无人机飞行控制、数据接收与处理、任务规划等功能。硬件含计算机、专用遥控器、数传电台、高清显示屏，支持设备连接与数据接收。

4.4.2 可编辑并加载航线，实时显示无人机飞行状态（速度、高度、电量等），预览采集数据（图像、视频等），记录故障日志，实现无人机飞行控制与任务监控。

4.5 通信网络

4.5.1 保障无人机与地面控制系统之间数据传输的稳定性与安全性，由光纤与专用数传模块构成双链路，隧道信号薄弱区可部署中继器。

4.5.2 数传模块传输低延迟控制指令，保障数据与指令双向传输连续稳定。

5 技术要求

5.1 无人机平台性能要求

5.1.1 防护等级（防尘防水）

机身整体防护等级不低于 IP54，可有效阻挡粉尘侵入，防止喷射水对设备造成损害；电机、飞控等关键部件防护等级不低于 IP65，能完全防止粉尘进入，且在任意方向喷水时均不会影响设备正常工作，适应隧道潮湿、多尘的恶劣环境。

5.1.2 抗电磁干扰能力

针对隧道内高压电缆、接触网等带电设备，无人机需具备绝缘防护功能，避免触电或电磁干扰；在隧道内强电磁干扰源附近仍能保持飞行姿态稳定、飞控系统正常工作、任务载荷数据采集准确。

5.1.3 飞行稳定性与操控精度

5.1.3.1 在隧道内3 m/s平均风速、5 m/s瞬时风速环境下,能保持既定航线飞行,悬停精度 $\pm(10-20)$ cm。

5.1.3.2 悬停时,水平位移偏差 $\leq\pm 0.3$ m,垂直位移偏差 $\leq\pm 0.2$ m。航线偏差 $\leq\pm 0.3$ m,手动操控模式下,最小控制步长 ≤ 0.1 m/s(速度控制)、 ≤ 0.1 m(位置控制)。

5.1.4 噪音控制

巡航飞行状态下(速度0.5 m/s~2 m/s),噪音值 ≤ 65 dB(距离无人机1 m处测量)。

5.1.5 动力与续航

采用高能量密度锂电池,支持热插拔更换,具备过充、过放、过流、短路保护功能。单块电池单次连续飞行时间 ≥ 15 min(含20%应急电量), -10 °C~ 45 °C温度范围内,电池性能衰减 $\leq 20\%$ 。

5.2 导航与定位要求

5.2.1 拒止环境导航能力

采用“视觉SLAM+惯性导航(INS)+激光雷达”融合定位方案,不依赖GNSS信号,确保隧道全区段(含深埋段、联络通道)精准定位与自主导航。

5.2.2 定位精度

水平定位误差 $\leq\pm 0.5$ m,垂直定位误差 $\leq\pm 0.3$ m;通过隧道内每隔50 m设置的定位辅助标记(如二维码、反光标识)校准后,水平定位误差 $\leq\pm 0.3$ m,垂直定位误差 $\leq\pm 0.2$ m。

5.2.3 避障能力

5.2.3.1 搭载多方向(前、后、左、右、下)避障传感器(激光+视觉),避障响应时间 ≤ 0.1 s,检测距离 ≥ 2 m,可自主规划避障路径或悬停报警。

5.2.3.2 手动操控时,接近障碍物距离 ≤ 1 m时,地面控制系统声光报警并限制向障碍物方向飞行速度。

5.3 任务载荷要求

5.3.1 可见光相机

像素 ≥ 2000 万,支持光学变焦(≥ 10 倍),机械快门;图像分辨率 $\geq 1920\times 1080$;具备自动对焦功能(对焦时间 ≤ 0.5 s)、多种拍摄模式(单拍、连拍、录像,连拍速度 ≥ 5 张/s),图像动态范围 ≥ 12 EV。

5.3.2 红外热像仪

分辨率 $\geq 640\times 512$,测温范围 -20 °C~ 150 °C,温度分辨率 ≤ 0.1 °C,支持拍照/录像;具备温度报警、温度校正、图像增强功能。

5.3.3 激光雷达

点云密度 ≥ 100 点/m²,测距精度 ± 5 mm,扫描频率 ≥ 300 kHz,激光等级1级;支持2D/3D扫描模式、点云实时去噪处理,可与无人机定位系统同步。

5.3.4 气体传感器

可检测CO(精度 ± 1 ppm)、H₂S(± 0.1 ppm)、CH₄($\pm 0.1\%$ LEL)、O₂($\pm 0.5\%$ VOL);具备浓度实时显示、超标报警、零点校准功能,数据采样频率 ≥ 1 Hz。

5.3.5 强光照明系统

照度 ≥ 500 lux(1 m距离处),色温 5500 K ± 500 K,支持多角度调节,无眩光。

5.4 通信系统要

5.4.1 链路协同可靠性

5.4.1.1 采用“光纤+无线电委员会规定的频段”融合通信方案,当任一链路信号强度过低时,系统需在 ≤ 1 s内自动切换至另一链路,切换过程不中断关键数据传输(如控制指令、实时图像预览)。

5.4.1.2 隧道深埋段、联络通道等信号薄弱区,需每隔300 m~500 m部署1台通信中继器,中继器需支持各频段信号同时放大,防护等级 \geq IP54,供电续航匹配单次巡检时长,通信链路误码率 $\leq 10^{-6}$ 。

5.4.2 延迟要求

控制信号传输延迟 ≤ 0.3 s,任务载荷数据传输延迟 ≤ 0.5 s。

5.4.3 抗干扰能力

抗干扰能力符合SRRC认证要求,符合GB/T 38909标准要求。

5.5 地面控制系统要求

5.5.1 功能要求

5.5.1.1 飞行控制:支持起飞、降落、悬停、巡航等操作,可预设、修改、加载航线,调节飞行参数。

5.5.1.2 数据处理:接收、存储、显示、初步处理多类型数据,支持格式转换与数据标注。

5.5.1.3 监控报警:实时监控无人机、载荷、通信状态,异常时声光报警并提示处置建议。

5.5.1.4 协同管理:支持多无人机连接与任务分配,具备人员资质与操作日志管理功能。

5.5.2 性能要求

数据接收延迟 ≤ 0.5 s,支持至少2台无人机同时连接;数据存储容量 ≥ 1 TB,可扩展;连续72 h运行无卡顿、崩溃,具备故障自恢复功能;兼容不同型号设备,可与隧道数字孪生平台数据交互。

5.5.3 界面要求

模块化布局,可自定义界面;关键信息图表化展示,图像视频支持多分辨率切换与缩放;支持鼠标、键盘、触摸屏操作及快捷键,具备多语言切换功能;有权限管理功能,区分不同角色操作权限。

6 作业流程规范

6.1 作业前准备

6.1.1 现场勘查与环境评估

6.1.1.1 勘查内容:隧道长度、断面尺寸、通风方式、障碍物分布、有害气体历史浓度、带电设备位置、应急通道及逃生路线。

6.1.1.2 定位标记:隧道内每隔50 m设置定位辅助标记(如二维码、反光标识),用于SLAM定位校准。

6.1.1.3 环境评估:判断有害气体浓度、障碍物、气流、光照对作业的影响,超标或存在风险时制定应对措施。

6.1.2 巡检方案与航线规划

6.1.2.1 方案编制:明确巡检目标(区段、重点部位、问题类型)、设备配置(无人机型号、载荷组合、备用设备)、人员分工、应急预案(设备故障、环境突变、人员不适处置流程与联络方式)。

6.1.2.2 航线规划:基于隧道数字孪生模型或勘察数据,选择直线(长距离线性部位)、环绕(复杂结构)、分层(衬砌分层检测,层间间距 ≤ 0.5 m)航线模式,标注起点、终点、拐点、安全距离,生成可视化航线图并模拟验证。

6.1.2.3 隧道巡检作业流程图见附录A。

6.1.3 设备检查与调试

6.1.3.1 无人机:检查机身、电机、电池(电量 $\geq 80\%$,无鼓包漏液),启动自检,测试飞行姿态、避障功能、载荷工作状态。

6.1.3.2 地面站：检查硬件连接与软件启动，导入航线，测试数据传输链路（信号强度 ≥ -70 dBm，延迟 ≤ 0.5 s）、监控报警功能。

6.1.3.3 辅助设备：检查强光照明、应急照明、灭火器、急救箱、手持经校准的有害气体检测仪。

6.1.4 空域申请与报备

6.1.4.1 空域申请：隧道外起降或穿越限飞区时，提前向空管部门申请，获得《无人驾驶航空器飞行任务批准书》。

6.1.4.2 安全报备：与隧道运营单位签订安全协议，明确作业时间（避开交通高峰、列车时段）、责任划分、应急联动机制，报备作业计划。

6.2 作业实施

6.2.1 起飞与降落

6.2.1.1 起降区域：选择隧道口、内部平整、无障、照明充足区域（面积 ≥ 2 m \times 2 m），清理积水杂物，设 5m 安全警示区。

6.2.1.2 起飞流程：飞手自检→安全员确认环境安全→起飞至 1.5 m 悬停→测试避障→数据回传无误后执行航线。

6.2.1.3 降落流程：返回起降点 1 m 悬停→安全员确认安全→垂直降落（速度 ≤ 0.2 m/s）→关电机拆电池。

6.2.2 飞行操作

6.2.2.1 控制模式：正常巡检用自动模式，复杂区域、重点检测用手动模式。

6.2.2.2 参数控制：重点区域速度 ≤ 0.5 m/s、高度 0.5 m~1 m；普通区域速度 0.5 m/s~2 m/s；剩余电量 30%提示返航，剩余电量 20%时准备返航。

6.2.2.3 姿态监控：实时监控俯仰角、横滚角（超 $\pm 10^\circ$ 及时调整），异常时启动应急程序。

6.2.3 数据采集

6.2.3.1 采集参数：可见光重点区域拍摄间隔 ≤ 1 s、普通区域 ≤ 3 s；红外帧率 ≥ 25 Hz；激光雷达按参数扫描；气体采样频率 ≥ 1 Hz。

6.2.3.2 质量控制：实时查看数据，图像模糊、红外温度异常、点云漏洞、气体数据波动时，调整参数重新采集。

6.2.3.3 存储备份：数据实时存地面站并本地备份，每 30 min 额外备份至移动硬盘。

6.2.4 实时监控与异常处置

6.2.4.1 监控分工：飞手监控无人机与通信状态，安全员监控环境与人员设备安全，任务员监控载荷与数据质量。

6.2.4.2 设备异常：低电量（ $\leq 30\%$ 提示返航， $\leq 20\%$ 准备返航， $\leq 10\%$ 应急降落）、失联（30 s后寻机）、定位丢失（切姿态模式降落）、载荷故障（调试或换备用）、姿态异常（调整或应急停机）。

6.2.4.3 环境异常：气体超标（返航通风）、风速骤增（悬停或返航）、渗漏水、照明故障（视情况终止作业）。

6.2.4.4 人员异常：人员不适（转移至通风处急救，飞手独立返航）。

6.3 作业后工作

6.3.1 设备回收与保养

6.3.1.1 即时维护（1 h内）：清洁设备（压缩空气清尘，酒精擦镜头），检查机身、电机、电池，电池充至 40%~60%存储。

6.3.1.2 定期维护：每日校准 IMU 与指南针；每月校准红外、激光雷达；每年全性能检测并更换老化部件。

6.3.2 数据导出与备份

6.3.2.1 数据导出:按“隧道名称-日期-区段-类型”命名(如“XX 公路隧道-20250915-K1+200-K1+500-可见光图像”),导出后清点完整性。

6.3.2.2 备份存储: AES-256 加密存储,“本地硬盘(不联网)+云端(等保三级以上)”双重备份;每3个月检查备份数据。

6.3.3 作业记录归档

6.3.3.1 记录整理:收集勘查记录、空域文件、方案、设备清单、飞行日志、数据记录、异常处置记录、人员出勤记录,审核后分类。

6.3.3.2 归档管理:纸质记录装订盖章存档案室,电子记录加密存服务器并关联数据;保存期限 ≥ 5 年,重大任务记录永久保存。

6.4 紧急情况预案

6.4.1 通讯中断

6.4.1.1 处置流程:

- a) 切换至备用链路,同时检查备用链路信号强度(需 ≥ -80 dBm);
- b) 若双链路均中断,执行预设应急返航程序,沿最近定位辅助标记方向返航,或在预存应急迫降点(航线规划时标注的平整区域,面积 $\geq 2\text{ m} \times 2\text{ m}$)迫降,迫降前自动关闭非必要载荷以节省电量。

6.4.1.2 人员联动:

- a) 安全员立即前往隧道内最近应急通道口,开启应急照明协助定位;
- b) 若无人机位于深埋段,联系隧道运营单位开启临时照明系统,避免地面人员寻机时发生磕碰。

6.4.1.3 事后处置:

- a) 回收无人机后,检测通信部件是否损坏;
- b) 地面站端检查数传接收设备,确保无信号干扰源残留。调取地面站故障日志,标注通信中断位置,若为电磁干扰,更新“隧道电磁干扰分布图”;
- c) 若为信号遮挡,后续作业时在该区域增设通信中继器。

6.4.2 动力失效

6.4.2.1 处置流程:启动应急迫降程序,打开机身缓冲装置,避开隧道内带电设备、管线及人员,选择无积水、无杂物的平整区域(如应急通道地面)迫降,迫降速度 $\leq 0.5\text{ m/s}$ 。

6.4.2.2 事后处置:

- a) 设备拆解检查:拆解失效电机,检查轴承磨损、绕组绝缘层状态;
- b) 检测电池电压、接口接触点,排查是否存在漏液、鼓包,故障电池需按合规流程回收;
- c) 更换动力部件后,在隧道外空旷区域试飞,测试电机转速稳定性、动力输出偏差,合格后方可复用。

6.4.3 无人机失控(偏航)

6.4.3.1 处置流程:

- a) 指令重置(高空失控):地面站操作员发送“系统重置指令”,重启飞控系统;重启后若恢复控制,立即调整航线至安全区域;
- b) 若仍失控,立即物理应急停机,切断电机动力,快速坠地以降低碰撞高风险结构的概率。

6.4.3.2 事后处置:

- a) 检测无人机及通信设备故障若无人机坠毁,回收机身、载荷残骸,用干粉灭火器扑灭可能的电池起火,避免电解液泄漏腐蚀隧道地面;
- b) 调取飞控日志、地面站操作记录,排查失控原因;若发生碰撞,协助运营单位检查碰撞区域的隧道结构、附属设施,若存在损坏,按要求上报并协助修复,无人机及隧道设施修复测试合格后才可复用。

6.4.4 其余紧急情况(如人员不适等)

结合客观情况，单独制定有效的应急方案。

7 数据管理与分析

7.1 数据采集要求

7.1.1 数据格式

7.1.1.1 可见光图像：JPEG（常规）、TIFF（高画质）；红外数据：图像 TIFF（含温度信息）、视频 MP4；激光雷达：LAS（标准）、PLY（可视化）；气体数据：CSV。

7.1.1.2 文本记录：PDF（归档）、Excel（原始表格）。

7.1.2 数据质量

7.1.2.1 可见光图像：清晰无模糊，分辨率 $\geq 5472 \times 3648$ ，色彩还原准确，能辨 0.2 mm 以上裂缝。

7.1.2.2 红外数据：热像清晰无噪声，温度分辨率 ≤ 0.1 °C，测温精度 $\leq \pm 2$ °C，视频流畅无卡顿。

7.1.2.3 激光雷达：点云完整无漏洞，密度 ≥ 100 点/m²，测距精度 ± 5 mm，噪声点 $\leq 1\%$ 。

7.1.2.4 气体数据：检测精度达标，采样频率 ≥ 1 Hz，数据无异常值，记录完整。

7.2 数据传输与存储

7.2.1 传输安全

加密传输：采用 TLS 1.3 协议，敏感数据端到端加密；专用频段传输，配频率跳变技术；身份认证与权限控制，防止非法接入。

7.2.2 存储介质与周期

7.2.2.1 存储介质：本地用 SSD（实时数据）、HDD（历史数据）并做 RAID 冗余；云端选等保三级以上平台，符合 GB/T 22239，支持弹性扩展。

7.2.2.2 存储周期：普通数据 ≥ 5 年，重大任务 / 安全问题数据永久保存；到期评估后决定延长或销毁。

7.2.3 数据分类与归档

7.2.3.1 分类方式：按来源（无人机、载荷、地面站）、类型（图像、视频、点云、文本）、目的（日常、安全、专项）、对象（主体结构、附属设施）分类。

7.2.3.2 归档流程：数据合格后整理，填申请表审核归档；记录归档信息形成清单，定期检查数据可用性。

7.3 数据处理与分析

7.3.1 预处理

7.3.1.1 数据清洗：剔除无效（模糊、残缺点云）、重复数据，修复轻微缺陷（图像增强、插值补全）。

7.3.1.2 数据校准：基于定位标记校准位置（误差 ≤ 0.3 m）；红外用标准黑体校准温度；气体传感器作业前零点校准，每月跨度校准。

7.3.1.3 格式转换：将非标准格式转为统一格式（如相机专用格式转 JPEG，传感器格式转 CSV），保留关键信息。

7.3.2 缺陷识别与分类

7.3.2.1 智能识别：可见光图像辨裂缝（ ≥ 0.2 mm）、剥落（ ≥ 0.01 m²）；红外辨空洞（温差 ≥ 2 °C）、锈蚀（温差 ≥ 3 °C）；激光雷达辨变形（ ≥ 2 mm）；气体数据超标报警。

7.3.2.2 人工复核：专业检测人员 100% 复核 AI 结果，修正漏检误判，按标准判定缺陷类型与严重程度。

7.3.2.3 缺陷分类：按部位（主体结构、附属设施）、严重程度（轻微、中等、严重）、原因（设计施工、运营维护、环境因素）分类。

8 维护与保养

8.1 维护周期

8.1.1 日常维护需贯穿巡检作业“前-中-后”全阶段，频次与作业行为强关联，确保设备每次投入使用前处于安全状态，作业后及时消除环境损耗。

8.1.2 定期保养需结合部件磨损规律与性能衰减周期，按月度、年度分级执行，确保关键性能指标不偏离标准。

8.1.3 当无人机系统在特殊工况下作业后，需额外增加维护频次，消除特殊环境导致的加速损耗，维护周期规划可参考 T/CITS 367 中设备维护的相关建议。

8.2 维护内容

8.2.1 维护后应确保设备性能恢复至原技术要求，验证需覆盖硬件状态、功能性能、实战适配性，未通过验证的设备禁止投入巡检作业。

8.2.2 日常维护：作业后清洁机身、镜头、传感器，去除粉尘污渍。检查机身、电机、螺旋桨、电池、载荷、地面站设备有无损坏或异常。每日检查软件版本并更新。

8.2.3 月度保养：校准任务载荷精度，检查电机运转状态，更换磨损螺旋桨。

8.2.4 年度保养：全性能检测（飞行精度、续航、避障），更换老化部件（电池、电机轴承、线缆），通信链路切换测试，中继器效率校准，优化地面站系统。

8.3 故障处理

8.3.1 故障排查：设备故障时，先通过自检、日志分析定位问题，必要时拆解检查部件。

8.3.2 维修流程：小故障现场修复（如更换电池、传感器）；大故障送专业维修机构，维修后测试合格方可使用。

8.3.3 故障记录：记录故障类型、时间、原因、处置过程与结果，纳入设备档案。

8.4 存储要求

8.4.1 存储环境：设备存专用库房（温度 0℃~25℃，湿度≤60%），避免阳光、潮湿、粉尘；电池单独存防爆箱（10℃~20℃），每半年补电至 50%。

8.4.2 运输保护：用减震防水专用箱，分区固定设备，避免剧烈振动，禁与腐蚀性物品混运。

8.4.3 报废处理：设备达寿命或无法维修时，评估后清除数据，合规回收（电池交资质单位，机身拆解回收）。

8.5 维护记录

8.5.1 格式与内容要求

8.5.1.1 载体形式采用电子记录为主、纸质备份为辅的方式；电子记录使用加密表格，纸质记录装订入设备专属档案册。

8.5.1.2 基础信息：维护日期、维护对象、维护人员、维护类型。

8.5.1.3 维护项目：逐项记录作业内容（如校准 IMU、更换电机轴承等），需标注具体操作参数（如校准误差值、更换部件型号）。

8.5.1.4 问题记录：若发现异常，详细描述问题现象、位置、初步判断原因。

8.5.1.5 处理结果：针对问题的处置措施、处理后状态。

8.5.1.6 验证结果：记录维护后验证数据，关键参数测试附截图。

8.5.2 存储与检索要求

8.5.2.1 存储期限：维护记录需与设备生命周期同步保存，设备报废后仍需留存≥5年；电子记录存储于加密服务器，纸质记录存放在防潮、防蛀的档案柜中。

8.5.2.2 检索能力：电子记录支持多维度检索（如按设备编号、维护日期、问题类型等），建立设备与维护记录间的关联索引，通过无人机编号调取历史维护记录。

9 安全要求

9.1 作业安全

9.1.1 人员安全

- 9.1.1.1 资质要求：飞手持民航局无人机执照，隧道巡检经验 ≥ 100 h；安全员需掌握应急处置技能。
- 9.1.1.2 防护装备：作业人员穿戴安全帽、反光背心、防滑鞋，隧道内额外携带防毒面具、护目镜。
- 9.1.1.3 健康保障：监测作业环境，人员不适时立即转移至安全区域急救，必要时送医。

9.1.2 设备安全

- 9.1.2.1 开机自检：启动后检测电机、飞控、传感器、载荷，故障时锁死起飞并报警。
- 9.1.2.2 操作规范：按流程起飞降落，避免超性能飞行；定期维护保养，备用设备齐全。
- 9.1.2.3 应急保护：配备物理应急停机按钮，失联或失控时手动切断动力。

9.1.3 环境安全

- 9.1.3.1 环境监测：作业前、中检测有害气体浓度、风速，超标时停止作业并通风。
- 9.1.3.2 设施保护：避开隧道内带电设备、临时设施，防止无人机碰撞损坏隧道设施。
- 9.1.3.3 应急处置：无人机坠落时设警戒区，若损坏设施或泄漏气体，启动对应应急措施。

9.2 特殊环境操作要求

9.2.1 低照度

能见度过低时，启用机载强光照系统，搭配红外热像仪辅助定位避障。降低飞行速度，保持与隧道壁安全距离，每50 m设置反光定位标记，实时预览图像清晰度，模糊时立即悬停调整照明角度。照明故障时，启动备用LED应急灯，若无法照明则沿预设反光标记返航，禁止盲目飞行。

9.2.2 有限空间

如条件允许可减少任务载荷，提前通过激光雷达扫描生成三维模型，标注突出物位置，采用分段式航线，拐点处预留回旋空间；在有限空间入口处设置近距离观察员，发现异常立即通过应急通信下达悬停指令。

9.2.3 电磁干扰

通信系统切换为“光纤+无线电委员会规定的频段”双链路，保持无人机与带电设备安全距离，采用手动操控模式（禁用自动航线），实时监控姿态数据。作业前24 h检测隧道内电磁分布，标注高干扰区域；对无人机进行电磁兼容预测试。

9.2.4 高湿高尘

镜头加装防尘防水罩（保证透光率），作业间隔每30 min停机清洁镜头，飞行结束后吹扫机身缝隙；数据采集时，可见光相机启用“抗雾模式”，激光雷达点云去噪频率提升至1次/5s。若现场湿度持续超标，更换专用电池并缩短飞行时间至 ≤ 20 min。

9.2.5 强风扰动

避开通风机运行时段，调高无人机悬停稳定灵敏度，降低飞行速度；在气流敏感区预留安全距离。监测到气流速度 ≥ 8 m/s时，无人机立即悬停并调整高度至气流相对稳定区域，必要时紧急降落。

9.2.6 极端温度

低温作业前，预热电池、飞控系统；高温作业时，无人机电机加装散热风扇；低温时缩短单次飞行时间至 ≤ 25 min，并预留应急电量，避免长时间悬停；高温时每20 min停机1次，冷却电机温度后再启动。必要时使用专用电池，极端温度下停止作业。

9.3 数据安全

9.3.1 通信加密

数据传输采用TLS 1.3 协议加密，敏感数据端到端加密；存储数据用AES-256加密，防止数据泄露，加密标准符合GB/T 22239。

9.3.2 访问控制

建立权限管理体系，按角色（飞手、安全员、分析师）分配数据访问权限；访问数据需审批，记录访问日志。

9.3.3 隐私保护

禁止泄露隧道结构、运营等敏感数据；数据共享需签订保密协议，确保数据仅用于巡检相关工作。

9.4 应急处置预案

9.4.1 故障应急程序

9.4.1.1 设备故障：低电量返航、迫降，失联后寻机，定位丢失切姿态模式降落，载荷故障调试或更换。

9.4.1.2 系统故障：通信中断启动应急通信，地面站崩溃时用备用地面站接管，软件故障重启并恢复数据。

9.4.2 事故处理流程

9.4.2.1 事故上报：发生无人机坠落、设施损坏、人员受伤时，立即上报隧道运营单位与监管部门。

9.4.2.2 现场处置：设警戒区，救援受伤人员，防止二次事故；评估损失，回收设备残骸，设施损坏评估需参考 JTG/T H21。

9.4.2.3 调查整改：分析事故原因，出具报告，落实整改措施，避免同类事故再次发生。

附录 A
(资料性)
隧道巡检作业流程图

A.1 隧道巡检作业流程图见图 A.1。



图 A.1 隧道巡检作业流程图

附 录 B
(资料性)
无人机巡检设备检查清单

B.1 无人机巡检设备检查清单见表 B.1。

表 B.1

检查项目	检查内容	检查结果	备注
无人机机身	无破损、变形，防护涂层完好		重点检查电机、飞控接口
电池	电量 $\geq 80\%$ ，无鼓包、漏液，接口清洁		备用电池数量 ≥ 3 块
可见光相机	镜头清洁，像素、变焦功能正常		拍摄测试图，确认清晰度
红外热像仪	测温校准正常，分辨率、帧率达标		拍摄标准黑体，测温误差 $\leq \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
激光雷达	点云密度、测距精度正常		扫描平面靶，点云均匀无漏洞
气体传感器	零位校准正常，数据传输实时		接触标准气体，响应时间 $\leq 5\text{ s}$
地面站	软件启动正常，航线导入无误，数传信号 $\geq -70\text{ dBm}$		测试数据回传延迟 $\leq 0.5\text{ s}$
安全装备	安全帽、反光背心、防毒面具、灭火器齐全有效		灭火器压力正常，防毒面具滤芯在有效期内
飞手资质	无人机执照在有效期内，隧道经验 $\geq 100\text{ h}$		核查执照编号及实操记录

检查人：_____ 检查日期：_____ 隧道名称：_____

附录 C
(资料性)
隧道无人机智能巡检内容

C.1 隧道无人机巡检内容见表 C.1。

表 C.1 隧道无人机智能巡检内容

巡检类别	主要巡检部位	巡检内容
主体结构	衬砌	表面裂缝（记录长度、宽度、深度及分布位置）、混凝土剥落（记录面积、剥落程度）、露筋锈蚀（记录锈蚀范围、钢筋裸露长度）、渗漏水（记录渗漏位置、渗漏量及形态，如滴水、流挂、湿润）、空洞（通过红外或雷达检测衬砌内部空鼓区域）、变形（通过激光雷达测量衬砌净空变化，判断是否存在收敛变形）
	仰拱/道床	混凝土裂缝、沉降（测量与设计标高的偏差）、破损（如道床板裂缝、掉块）、积水（记录积水范围、深度）、杂物堆积（影响结构受力或排水的堆积物）
	洞门	结构裂缝、风化剥落、基础冲刷（记录冲刷深度、范围）、变形（如洞门倾斜、位移）、密封胶老化（记录老化长度、开裂情况）
	联络通道、横通道	衬砌裂缝、渗漏水、防火门状态（是否完好、关闭严密）、通道内杂物堆积、照明及应急设备完好性
附属设施	照明系统	灯具损坏（记录损坏数量、位置）、高度不足（对比设计高度标准，记录不达标区域）、线路老化（如线缆裸露、绝缘层破损）、配电箱故障（如开关损坏、指示灯异常）
	通风系统	风机运行状态（是否异响、振动异常）、风道堵塞（记录堵塞位置、程度）、风阀故障（是否能正常开启/关闭）、通风口损坏（如格栅变形、缺失）
	消防系统	消防栓损坏（如接口漏水、阀门失效）、灭火器缺失或过期（记录位置、类型）、消防管道渗漏（记录渗漏点）、火灾报警装置故障（如探测器失效、报警器无响应）、防火卷帘门状态（是否能正常升降、关闭严密）
	监控系统	摄像头损坏（记录位置）、角度偏移（无法覆盖预设监控区域）、画面模糊（影响监控效果）、传输故障（无信号或信号中断）
	排水系统	排水沟堵塞（记录堵塞位置、堵塞物类型）、排水管破损（记录破损位置、程度）、集水井积水（记录积水深度、水泵运行状态）、排水泵故障（无法启动或排水能力不足）
	供电系统	电缆桥架损坏（变形、锈蚀）、电缆绝缘层破损（裸露）、配电箱内元器件故障（如接触器粘连、指示灯损坏）、接地装置完好性（接地电阻

巡检类别	主要巡检部位	巡检内容
		是否符合要求)
	交通设施（公路、轨道交通隧道）	车道标线模糊（无法清晰识别）、反光标识损坏（缺失、反光效果不足）、紧急电话故障（无信号、无法通话）、限速/警示标志缺失或破损、轨道扣件松动/缺失（轨道交通隧道）、接触网/轨状态（如接触网磨耗、偏移，轨道交通隧道）
维修后质量评估	维修部位	衬砌修补处裂缝（是否复发、新裂缝产生）、剥落（修补材料是否脱落）、渗漏水（维修后是否仍渗漏）；附属设施维修后运行状态（如更换灯具高度、修复消防栓出水情况、修复排水泵排水能力）