

# 团 体 标 准

T/CCTAS XXXX—XXXX

## 城市轨道交通无人机巡检技术规范

Technical Specification for UAV Inspection in Urban Rail Transit

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2026年02月)

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。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发布

## 目录

前言 .....	III
1 范围 .....	4
2 规范性引用文件 .....	4
3 术语和定义 .....	4
4 总体要求 .....	4
5 无人机巡检系统组成和要求 .....	5
6 巡检场景与内容 .....	9
7 巡检技术要求 .....	11
8 检测验证与试验方法 .....	15
附录 A （资料性） 测试报告 .....	18

## 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。

本文件由中国交通运输协会智慧物流专业委员会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：铁科院（深圳）研究设计院有限公司、北京交通大学、重庆轨道交通运营有限公司、合肥轨道交通集团有限公司、青岛地铁集团有限公司、石家庄轨道交通集团有限公司、通号城市轨道交通技术有限公司、成都工贸职业技术学院、中创智维科技有限公司、智奇铁路设备有限公司、上海市建筑科学研究院有限公司、铁科院（北京）工程咨询有限公司、苏州轨道交通城市运维服务有限公司、北京智洋慧通数字科技有限公司、武汉市规划研究院（武汉市交通发展战略研究院）、河南思维轨道交通技术研究院有限公司、中铁检验认证中心有限公司、天津市地质工程勘测设计院有限公司、卡斯柯信号有限公司、南京恩瑞特实业有限公司、北京神州高铁轨道交通科技有限公司、深圳市市政设计院有限公司、郑州轨道工程职业学院、中铁第四勘察设计院集团有限公司、浙江国创科技有限公司、南京市测绘勘察研究院股份有限公司、广州铁科智控有限公司、广州地铁集团有限公司、四川省中车铁投轨道交通有限公司、青岛城市轨道交通科技有限公司、浙江锐明智能控制技术有限公司、山东大学、大连博大盛世发展有限公司、济南低空经济发展集团有限公司、北京煜邦电力技术股份有限公司、广州欧徕测绘技术有限公司、浙江京格智航科技有限公司、通号低空经济（合肥）科技有限公司、北交思源（北京）工程技术有限公司。

本文件主要起草人：闫晓夏、李俊鑫、侯涛刚、王菁、文成祥、蔡佩红、陶冶来、刘肖、芦睿泉、王慧珺、杜海源、王东、高炜、陈康文、王清平、郑有春、李有权、陈忠林、李少娟、李伟豪、茹磊磊、黄帆、吴廷、潘蕾、郭牧、陈显阳、吴方林、朱魏、黄书博、谷亚军、陆玮、沈小兵、刘海尧、梅洋、曹旭、许克、黄焕、孙小丽、王东、陈华、高嵩、李玲琦、杨墨照、赵霄、陈慧军、张延伟、郭鼎丞、鲁培琳、张磊、高亮、栗红宇、吕金辉、王恒、景顺利、李春驰、徐先良、林育钦、李帝呈、高天伦、王波、周侃、张慧怡、古君豪、朱俏客、付宁、韩雷斌、周岩、刘丹丹、张伟、唐霏、吴越、汪小齐、段伟、史剑、龙广钱、孙旺、周海鹏、张楚潘、陈卓雄、张俊林、陈滔、赵宏宇、刘丙林、冯展平、曲伟强、王志伟、寇磊、郭峰、吴兴振、宋以峰、赵平平、冯洋磊、彭松、杨小勇、尉永平、赵岩、林悦、刘伟、王海南、闫敬涛。

# 城市轨道交通无人机电检技术规范

## 1 范围

本文件规定了城市轨道交通无人机电检的总体要求、无人机电检系统组成和要求、电检场景与内容、电检技术要求、检测验证与试验方法、应急处置等内容。

本文件适用于城市轨道交通运营单位、运维企业对城市轨道交通线路、结构、设备及附属设施开展的无人机电检作业。

## 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 25070 信息安全技术 网络安全等级保护安全设计技术要求
- GB/T 28181 公共安全视频监控联网系统信息传输、交换、控制技术要求
- GB/T 38909 民用无人机系统电磁兼容性要求与试验方法
- GB 50157 地铁设计规范
- MH/T 2008 无人机系统术语
- ISO 12233 摄影 电子静态照相机 分辨率和空间频率响应测量

## 3 术语和定义

MH/T 2008界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 城轨无人机电检 urban rail transit UAV inspection

利用无人驾驶航空器系统搭载任务载荷，按照预定策略对城市轨道交通基础设施（通常包括桥梁、高架线路、路基、轨道、接触网、变电所及附属设施等）及周边环境进行数据采集、状态监测和隐患排查的作业活动。

### 3.2 电检任务 inspection task

为实现特定电检目的而生成的，包含电检对象、飞行航线、采集点位、载荷参数、作业流程及安全策略等信息的指令集合。

## 4 总体要求

### 4.1 基本原则

4.1.1 电检作业应坚持“安全第一、预防为主”的原则，确保城市轨道交通列车运行安全、设施设备安全及人员安全。

4.1.2 电检作业不应侵入城市轨道交通建筑限界，不应干扰通信信号及列车调度系统。

4.1.3 电检作业应符合国家空域管理、民用无人驾驶航空器管理以及城市轨道交通运营管理的有关规定。

### 4.2 设备要求

4.2.1 无人机电检系统应具备产品合格证或质量检测报告，并满足作业区域的气象、电磁环境适应性要求。

4.2.2 无人机应具备断链路返航、低电量报警与返航、应急避障及禁飞区限制等安全保护功能。

4.2.3 搭载的任务载荷应与飞行平台通过可靠的机械接口和电气接口连接，且不应影响飞行平台的稳定性。

4.2.4 采用全自动飞行系统进行巡检时，系统应具备远程控制、状态自检及异常自动终止任务的功能。

#### 4.3 环境与条件

4.3.1 巡检作业应在获得空域管理部门的飞行管制许可及城市轨道交通运营单位的作业许可后方可实施。

4.3.2 涉及接触网、变电所等高压带电设备区域的巡检，应满足带电作业的安全距离要求；需停电作业时，应在规定的作业时间窗口（如维修天窗点）内进行。

4.3.3 作业现场的气象条件（如风速、能见度、降雨量等）应符合无人机飞行手册规定的运行极限要求。

#### 4.4 数据安全

4.4.1 巡检数据的采集、传输、存储和处理应符合国家及行业网络安全、数据保密管理的规定。

4.4.2 涉及城市轨道交通关键基础设施的敏感地理信息数据，应采取加密、脱敏等安全防护措施。

### 5 无人机巡检系统组成和要求

#### 5.1 总体架构

##### 5.1.1 系统组成

城市轨道交通无人机巡检系统（以下简称“系统”）应由无人机（飞行平台）、无人机场/地面站、任务载荷设备、通信链路及信息处理系统组成。各组成部分应通过标准化接口进行集成，并应具备本章其他小节规定的性能指标。

##### 5.1.2 架构逻辑

系统应采用分层架构设计，各层功能要求如下：

5.1.2.1 感知执行层：应具备搭载多种任务载荷的能力，能够根据指令获取符合第6章巡检场景与内容规定的各类巡检对象的数据。

5.1.2.2 传输网络层：应构建可靠的测控链路和数据链路，支持在复杂电磁环境下实现指令下发与数据回传。

5.1.2.3 数据处理层：应具备数据存储、边缘计算及AI推理能力，支持对巡检数据进行处理与分析。

5.1.2.4 业务应用层：应提供人机交互界面，支持作业人员对系统参数进行配置与管控。

##### 5.1.3 任务执行支撑能力

系统应具备支撑全流程巡检作业的功能，以满足第7章规定的面向作业任务的技术要求：

5.1.3.1 参数配置能力：信息系统应具备对飞行高度、速度、航线重叠率、采集间隔等作业关键参数的配置功能。

5.1.3.2 场景适应能力：系统应支持任务载荷的快速更换或多载荷同飞，以适配不同的巡检场景及采集需求。

5.1.3.3 过程监控能力：系统应具备实时遥测功能，能够实时显示并记录飞行状态及载荷工作状态。

##### 5.1.4 验证与安全支撑能力

系统应具备可验证性与安全保护功能，以满足第8章检测验证与试验方法及第9章应急处置的要求：

5.1.4.1 数据接口：系统应预留标准化的物理接口与数据接口，支持按第8章规定的方法进行检测与验证。

5.1.4.2 日志记录：系统应具备全参数日志记录功能，支持飞行轨迹与作业数据的溯源。

5.1.4.3 应急逻辑：系统应内置故障诊断与自动保护策略，为第9章规定的应急处置提供功能支持。

## 5.2 无人机

### 5.2.1 感知与识别性能

无人机应具备对城市轨道交通设施及环境目标进行有效感知与识别的能力，其搭载的成像设备在成像质量和分辨能力方面应符合 ISO 12233 的有关规定。

### 5.2.2 定位与导航性能

无人机的关于定位与导航的技术指标与验收要求应符合表1规定。

表1 定位与导航的技术指标与验收要求

指标类别	技术指标	验收要求
航迹保持精度（隧道/遮挡环境）	500m连续飞行偏差 $\leq\pm 0.5\text{m}$	在弱定位环境（如GNSS弱覆盖、遮挡、隧道等）下验证航迹保持能力即可，所采用的自主导航方式应满足航迹偏差要求，不限定必须使用SLAM技术；
障碍物定位误差	$\leq\pm 1.0\text{m}$ （沿轨方向）	与列车障碍物定位一致

### 5.2.3 牵引供电电磁环境适应性

无人机应具备在城市轨道交通牵引供电系统电磁环境下稳定作业的能力，其飞行控制、姿态感知及通信链路在电磁干扰条件下不应出现异常，不对行车安全产生不利影响。电磁兼容性要求与试验方法应符合 GB/T 38909 的有关规定。

### 5.2.4 受限空间与暗环境飞行能力

针对地下隧道、箱梁内部等GNSS信号缺失及低光照环境，无人机应满足：

5.2.4.1 无卫导航精度：在无卫星定位信号的隧道内，应利用视觉、激光雷达或多源融合定位技术实现自主飞行，飞行轨迹偏差应 $\leq 0.3\text{m}$ ，且不随飞行距离累积发散。

5.2.4.2 暗光感知：在照度低于10 lux的环境中（如隧道夜间停电作业），应具备辅助照明或夜视感知能力，确保能识别隧道壁、接触网支柱及附属设施。

### 5.2.5 轨道交通设施精细化避障

避障系统应针对轨道交通线性及杆塔类障碍物进行优化：

5.2.5.1 线性物体识别：应能有效识别直径 $\geq 10\text{mm}$ 的接触网线索（接触线、承力索）、定位管及腕臂等细长金属构件。

5.2.5.2 复杂背景避障：在隧道狭窄空间或高架声屏障区域，应能过滤墙面纹理干扰，准确测量与隧道壁、接触网支柱及信号机的距离，最小安全避障距离应支持在0.5 m~2.0 m范围内根据作业工况进行设定。

### 5.2.6 活塞风与尾流抗扰动能力

无人机应具备抵抗城市轨道交通特有气流扰动的能力：

5.2.6.1 活塞风适应：在隧道口或风井处遭遇突发气流（风速突变梯度 $\geq 5\text{m/s}^2$ ）时，应能自动调整姿态维持稳定悬停或按预定航线飞行。

5.2.6.2 阵风修正：在高架线路遭遇高架桥特有的横向阵风时，最大位置偏移量应 $\leq 0.5\text{m}$ ，确保不侵入列车建筑限界。

### 5.3 地面站

#### 5.3.1 部署位置

地面站的部署应结合线路条件，优先选择车辆段、停车场屋顶、地面/高架车站附属区域或区间风井等相对开阔、安全且便于维护的地点。

#### 5.3.2 定位方式

地面站应具备对无人机的高精度定位或起降引导能力，具体要求如下：

5.3.2.1 技术路线：应采用开放式、标准化的技术架构。在满足作业安全的前提下，宜采用多源融合定位技术，支持根据作业场景选择适应的定位方案。

5.3.2.2 卫星定位：应具备全球导航卫星系统(GNSS)接收功能，应优先支持北斗卫星导航系统(BDS)及RTK高精度差分定位，定位数据应能与飞行平台实时交互。

5.3.2.3 辅助定位：针对卫星信号遮挡、低能见度或狭窄空间等复杂环境，宜选用视觉导航、激光雷达SLAM、红外信标或其他非卫星定位技术作为补充或冗余，以保障起降与停靠过程的稳定性。

5.3.2.4 性能要求：无论采用何种技术路径，引导定位精度应满足无人机精准起降及自动充（换）电接口对接的误差要求。

#### 5.3.3 作业周转与供电保障

地面站应采用快速充电或自动换电技术，单次作业周转时间（从降落锁止到再次具备起飞条件）应 $\leq 15\text{min}$ ，以适应城市轨道交通车间隔或短时维修天窗的作业需求。

#### 5.3.4 隧道及轨旁环境适应性

5.3.4.1 抗风压能力：部署于隧道内或轨旁的无人机场，其结构强度及舱门驱动机构应能承受列车通过时产生的活塞风及气动载荷冲击（最大瞬时风压标准值应符合GB 50157中关于附属设施的规定，或不低于 $3000\text{Pa}$ ）。

5.3.4.2 温湿控制：机舱内部应具备除湿与温控系统，在隧道高湿环境下（相对湿度 $>90\%$ ），舱内湿度应控制在无冷凝范围，防止电子元器件受潮腐蚀。

#### 5.3.5 现场感知与自检

5.3.5.1 微气象监测：地面站应配置独立的气象感知单元，具备对部署点的风速、雨量及环境温湿度的实时监测能力，数据更新频率应 $\geq 1\text{Hz}$ 。

5.3.5.2 入侵检测：在无人机起降区域周边宜设置红外或视觉入侵检测装置，当检测到人员或异物进入起降范围时，应自动暂停起降程序并向远端告警。

5.3.5.3 健康管理：系统应具备对机械臂/连杆状态、电机电流、电池健康度（SOH）的自检功能，故障告警应分级上报至综合运维平台。

#### 5.3.6 网络与数据接口

5.3.6.1 有线传输优先：地面站/无人机场应优先采用光纤或以太网等有线方式接入城市轨道交通专用通信网络，以保障控制指令的安全性与抗干扰能力。

5.3.6.2 协议兼容性：数据交互接口应支持标准的工业通信协议（如TCP/IP、Modbus或MQTT），并支持通过GB/T 28181协议向视频管理平台推送实时监控视频流。

### 5.4 任务载荷设备

#### 5.4.1 可见光采集设备

5.4.1.1 成像性能：有效像素应 $\geq 2000$ 万，支持拍摄 $4\text{K}@30\text{fps}$ 视频。

5.4.1.2 变焦能力：应具备光学变焦功能，最大混合变焦倍数应 $\geq 20$ 倍，在距目标 $5\text{m}$ 处可分辨直径 $2\text{mm}$ 的销钉缺失或螺母松动。

5.4.1.3 低照度适应：应具备夜景模式或配备补光灯，在隧道低光照环境下（ $\leq 10\text{lux}$ ）能清晰成像。

## 5.4.2 红外热成像设备

5.4.2.1 分辨率：非制冷型红外探测器分辨率应 $\geq 640 \times 512$ 。

5.4.2.2 测温性能：测温范围应覆盖 $-20^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ ，测温误差应 $\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$ 或测量值的 $\pm 2\%$ （取较大值）。

5.4.2.3 功能要求：应支持全屏最高/最低温自动捕捉、等温线显示及色板切换功能。

## 5.5 人员

5.5.1 作业人员必须持有民航局认可的无人机驾驶员执照（VLOS/BVLOS），并经城市轨道交通安全培训合格后方可上岗。

5.5.2 操作人员应熟悉作业区域线路结构、供电系统、信号系统、通信与行车调度规则。

5.5.3 每次作业前必须组织安全交底，明确任务区段、风险点、联络方式及紧急处置方案。

5.5.4 严禁单人作业。每次任务至少配置2人：操作员1人、监护员1人。特殊区域（如隧道、站台）应增加安全员。

5.5.5 作业人员应配备防护用品，包括绝缘手套、安全帽、防静电服、头灯及反光背心。

5.5.6 严禁在酒后、服药、疲劳状态下执行无人机操作任务。

## 5.6 信息系统功能

### 5.6.1 任务规划与航线管理

5.6.1.1 三维航线规划：系统应支持导入线路KML/KMZ文件、BIM模型或倾斜摄影实景三维模型，具备基于三维环境的航点规划功能，能够自动生成避开接触网支柱及隧道壁的无碰撞飞行路径。

5.6.1.2 仿地/仿线飞行：应具备随线路坡度及曲率变化的自适应飞行功能，能够设定恒定的相对高度（距轨面高度）和侧向距离，确保采集影像的分辨率（GSD）一致性。

5.6.1.3 断点续飞：系统应具备任务记忆功能，当任务因电池耗尽或中断而暂停时，应记录断点坐标，并在更换电池或恢复后支持从断点处继续执行任务。

5.6.1.4 电子围栏管控：应支持基于GIS的三维地理围栏设置，支持导入禁飞区（如变电所核心区）和限高区数据，并具备临界告警与自动悬停功能。

### 5.6.2 实时监控与指令交互

5.6.2.1 信息系统应支持巡检视频的实时接入与显示，其视频接入与传输方式应符合 GB/T 28181 的有关规定。

5.6.2.2 低时延传输：在视距（VLOS）范围内，从影像采集到地面端显示的端到端时延应 $\leq 300 \text{ ms}$ ；在超视距（BVLOS）及4G/5G公网传输条件下，时延应 $\leq 500 \text{ ms}$ 。

5.6.2.3 链路冗余切换：系统应支持专用链路（微波/数传）与公网链路（4G/5G）的自动或手动切换。当主链路信号质量低于阈值（如RSSI  $< -85 \text{ dBm}$ ）持续2 s时，应自动切换至备用链路，切换过程数据丢包率应 $\leq 1\%$ 。

### 5.6.3 数据处理与智能分析

5.6.3.1 图像预处理：系统应具备图像去雾、增稳、亮度自适应调整及元数据（POS）自动关联功能。

5.6.3.2 AI缺陷识别：系统应内置针对城市轨道交通设施的智能识别算法，支持对上述关键目标（如鸟巢、绝缘子破损、扣件缺失）的自动检测与标注。常见缺陷的检出率应 $\geq 90\%$ ，误报率应 $\leq 10\%$ 。

5.6.3.3 三维重建支持：系统应支持基于序列影像的快速拼图与三维建模，能够生成带有地理坐标的正射影像（DOM）和实景三维模型（OSGB/3D Tiles）。

### 5.6.4 数据管理与安全审计

5.6.4.1 数据管理与日志审计：信息系统应具备巡检数据管理和运行日志记录能力，满足运行溯源和安全审计的需要。数据管理与日志审计相关要求应符合 GB/T 22239、GB/T 25070 的有关规定。

5.6.4.2 数据安全与权限管理：信息系统应具备数据安全防护和访问控制能力，防止未经授权的数据访问、篡改或泄露。涉及关键基础设施的敏感信息，其安全防护措施应符合 GB/T 22239 的有关规定。

## 5.6.5 接口互联

系统应提供标准化的API或SDK接口，支持与以下外部系统的数据交互：

5.6.5.1 生产管理系统（EAM/PMS）：支持将确认后的缺陷自动生成工单并推送到运维管理平台。

5.6.5.2 综合监控系统（ISCS）：支持将无人机实时视频流推送到控制中心大屏。

5.6.5.3 城市低空监管平台：支持按规定向空域管理部门上报飞行动态数据。

## 6 巡检场景与内容

### 6.1 高架区间巡检

#### 6.1.1 场景描述

高架区间巡检是指无人机在城市轨道交通高架桥梁段、地面段及过渡段进行的巡检作业。该场景具有空域相对开阔但受周边建筑物、声屏障及横风影响较大的特点。

#### 6.1.2 巡检内容

6.1.2.1 土建结构：桥墩裂缝、混凝土剥落、露筋、支座变形、伸缩缝损坏、排水管脱落、声屏障立柱松动及屏体破损。

6.1.2.2 线路设施：轨道板裂缝、底座板离缝、侧向挡块缺失、电缆槽盖板缺失。

6.1.2.3 周边环境：桥下违章建筑、堆载、火灾隐患及保护区内的超高植物或大型机械施工。

#### 6.1.3 作业流程

6.1.3.1 环境勘察：确认起降点周边无高大建筑物遮挡，风速符合飞行要求。

6.1.3.2 航线规划：根据线路走向及桥墩位置，规划贴近桥梁侧面及底面的飞行路径，设置合理的重叠率。

6.1.3.3 飞行作业：无人机按预定航线飞行，对桥梁外侧、底部及声屏障外侧进行多角度拍摄。

6.1.3.4 数据回传：实时回传巡检画面，发现危及行车安全的重大隐患（如异物侵限）立即悬停报警并通报。

### 6.2 地下隧道区间巡检

#### 6.2.1 场景描述

地下隧道区间巡检是指无人机在盾构隧道、明挖隧道或地下车站区间内进行的巡检作业。该场景具有无GNSS信号、低光照、空间狭窄及存在活塞风干扰的特点。

#### 6.2.2 巡检内容

6.2.2.1 隧道结构：管片开裂、掉块、错台、渗漏水（甚至涌水）、道床脱空及疏散平台破损。

6.2.2.2 附属设施：消防管道、照明灯具、电缆支架的脱落或松动。

6.2.2.3 异物入侵：隧道顶部或侧壁悬挂的异物（如脱落的广告布、塑料膜）。

#### 6.2.3 作业流程

6.2.3.1 进入许可：确认接触网已停电（或符合带电作业条件），开启隧道照明或无人机自带补光灯。

6.2.3.2 定位校准：在隧道口或特征点进行视觉/激光定位系统的初始化校准。

6.2.3.3 飞行作业：无人机沿隧道中线或指定侧壁飞行，利用避障系统保持与管片及线缆的安全距

离，进行低速抵近拍摄。

6.2.3.4 异常处置：遇信号丢失或定位漂移，立即执行悬停或原地降落策略，人工接管回收。

### 6.3 边坡与防护区巡检

#### 6.3.1 场景描述

边坡与防护区巡检是指无人机对路基边坡、挡土墙及线路安全保护区（红线外）进行的巡检作业。

#### 6.3.2 巡检内容

6.3.2.1 地质灾害：边坡塌方、滑坡、泥石流迹象、危岩落石及挡土墙鼓胀、开裂。

6.3.2.2 排水系统：截水沟、排水沟的堵塞、破损或淤积。

6.3.2.3 防护设施：防护栅栏倒塌、破损、被人为破坏开口。

6.3.2.4 违规侵占：保护区内的违章搭建、堆土、挖掘作业及种植高大乔木。

#### 6.3.3 作业流程

6.3.3.1 大范围普查：采用正射影像拍摄模式，对沿线保护区进行宽幅覆盖拍摄，生成全景拼图。

6.3.3.2 重点详查：发现疑似隐患点（如滑坡体、施工点）后，降低高度进行多角度悬停拍摄或视频录制。

6.3.3.3 对比分析：将采集数据与历史数据比对，分析边坡形变趋势或违建增长情况。

### 6.4 轨道与道床巡检

#### 6.4.1 场景描述

轨道与道床巡检是指无人机对钢轨、扣件、轨枕及道床状态进行的精细化巡检作业。

#### 6.4.2 巡检内容

6.4.2.1 轨道部件：钢轨断裂、焊缝裂纹、扣件缺失/松动/弹条断裂、夹板螺栓缺失。

6.4.2.2 道床状态：整体道床裂缝、板下脱空、积水；碎石道床翻浆冒泥、道砟流失。

6.4.2.3 行车异物：掉落在轨行区的金属件、石块、树枝或其他可能导致列车脱轨的障碍物。

#### 6.4.3 作业流程

6.4.3.1 参数设置：选用高分辨率相机或变焦镜头，设置较低的飞行高度（如距轨面5 m~10 m）和较慢的飞行速度。

6.4.3.2 精细飞行：无人机沿轨道中心线飞行，镜头垂直向下或保持一定倾角，确保能清晰拍摄到扣件细节。

6.4.3.3 AI初筛：利用机载或地面站AI算法实时识别扣件缺失等典型病害，并标记位置。

### 6.5 接触网与供电系统巡检

#### 6.5.1 场景描述

接触网与供电系统巡检是指无人机对接触网（刚性/柔性）、变电所及供电线缆进行的巡检作业。该场景具有强电磁干扰、高电压及部件细小的特点。

#### 6.5.2 巡检内容

6.5.2.1 接触网悬挂：绝缘子破损/闪络、定位器脱落、开口销缺失、螺母松动、棘轮补偿装置卡滞。

6.5.2.2 线索状态：接触线/承力索断股、烧伤、磨损及异物缠绕（如风筝线、塑料袋）。

6.5.2.3 变电设备：变压器外观、套管破损、线夹发热（红外检测）、油位异常及呼吸器硅胶变色。

#### 6.5.3 作业流程

6.5.3.1 多载荷协同：搭载可见光相机检查外观，搭载红外热像仪检查发热点。

6.5.3.2 多角度拍摄：针对绝缘子串、定位管等关键部件，采用盘旋或多角度悬停拍摄，避免视线遮挡。

6.5.3.3 红外测温：在带电负荷状态下，利用红外热像仪对电连接线夹、隔离开关触头进行测温，记录最高温度点。

## 6.6 车站及附属设施巡检

### 6.6.1 场景描述

车站及附属设施巡检是指无人机对车站屋顶、外立面、风亭、冷却塔及出入口雨棚进行的巡检作业。

### 6.6.2 巡检内容

6.6.2.1 屋面设施：屋顶漏水、防水层老化、天窗破损、避雷带锈蚀/断裂、排水沟堵塞。

6.6.2.2 外立面：幕墙玻璃破裂、外墙瓷砖脱落、广告牌松动。

6.6.2.3 空调设备：冷却塔风机外观、异响及周边杂物堆积。

### 6.6.3 作业流程

6.6.3.1 分区规划：将车站区域划分为屋顶区、立面区和附属设施区，分别规划航线。

6.6.3.2 立面环绕：对车站外立面采用环绕飞行模式，分层拍摄。

6.6.3.3 细节检查：对屋顶接缝、排水口等易漏水部位进行定点悬停检查。

## 6.7 车辆段与场区巡检

### 6.7.1 场景描述

车辆段与场区巡检是指无人机在城市轨道交通车辆段（停车场）、综合维修基地及试车线区域进行的巡检作业。该场景具有建筑密集、股道众多、电磁环境复杂及兼具室内外作业环境的特点。

### 6.7.2 巡检内容

6.7.2.1 库房与建筑：运用库/检修库屋顶防水层状态、天窗破损、光伏板组件异常（如有）、避雷设施锈蚀及外墙脱落。

6.7.2.2 场区线路：咽喉区道岔状态、碎石道床植被侵限、场区排水沟堵塞及围墙周界完整性（防入侵）。

6.7.2.3 试车线设施：试车线接触网悬挂状态、路基边坡稳定性及沿线声屏障/围挡的破损情况。

6.7.2.4 段内安防：夜间场区内的异常人员活动、火源监测及车辆段出入口的车辆积压情况。

### 6.7.3 作业流程

6.7.3.1 分层规划：针对库外开阔区域采用高空覆盖飞行，针对库内或股道间采用低空穿梭飞行。

6.7.3.2 屋顶精查：重点对运用库超大面积屋顶进行“之”字形扫描飞行，检查漏水隐患及光伏设备热斑。

6.7.3.3 周界巡逻：沿车辆段围墙边界进行自动巡航，利用红外载荷检查是否存在人员翻越或围墙倒塌缺口。

6.7.3.4 配合联动：在防汛预警期间，重点检查场区低洼地带及排水沟渠的积水情况，指导地面排水作业。

## 7 巡检技术要求

### 7.1 高架区间作业技术要求

#### 7.1.1 定位模式

应采用RTK固定解（Fix）模式作业。当卫星信号失锁（如受高大楼宇遮挡）导致定位转为单点解或浮点解时，应悬停等待或升高飞行高度，直至恢复固定解。

### 7.1.2 多维航线规划

7.1.2.1 梁体侧面：航线应平行于线路走向，镜头光轴与水平面夹角宜为 $0^{\circ}$ 或 $-15^{\circ}$ 。

7.1.2.2 梁底支座：应规划低于桥面的仰视航线，镜头光轴上仰角度宜为 $+15^{\circ}\sim+30^{\circ}$ ，且无人机应位于接触网立柱外侧2 m以外。

7.1.2.3 重叠度修正：在曲线半径 $R\leq 300$  m的小半径曲线段，外侧航线的航向重叠率应额外增加10%，以补偿视角变化带来的覆盖缺失。

### 7.1.3 裂缝识别精度

7.1.3.1 重点区域（如梁体跨中受拉区）：GSD应 $\leq 0.1$  cm/pixel，且影像应保证裂缝走向与光照方向夹角 $\geq 30^{\circ}$ ，利用阴影增强裂缝辨识度。

7.1.3.2 一般区域：GSD应 $\leq 0.5$  cm/pixel。

### 7.1.4 作业安全要求

7.1.4.1 防坠落保护：在跨越城市道路、人行道或居民区上空作业时，无人机应配备并在开启降落伞或断桨保护功能的状态下飞行。若不具备物理缓降功能，不应在非封闭区域进行悬停作业。

7.1.4.2 抗风策略：作业前应测量高架桥面风速。当阵风风速超过 10 m/s（5级风）时，应立即停止作业并降落。

7.1.4.3 限界避让：无人机在任何情况下不应侵入列车车辆轮廓线外扩 2 m 的空间范围（除非是在封锁线路的天窗点内）。

7.1.4.4 应急返航点：返航点（Home Point）不应设置在桥面上，应设置在桥下空旷且无人员聚集的地面区域，防止低电量自动降落时落入轨行区。

## 7.2 地下隧道区间作业技术要求

### 7.2.1 多源融合定位

无人机应具备视觉里程计（VIO）与激光雷达SLAM的融合定位能力。在长距离（ $>1$  km）隧道作业时，宜每隔500 m利用已知特征点（如百米标）进行一次位置校准，累积定位误差应控制在作业距离的1%以内。

### 7.2.2 主动补光策略

7.2.2.1 布光方式：应采用双光源非同轴布光设计（如机臂两侧灯光），以消除尘埃粒子的漫反射光斑。

7.2.2.2 照度标准：被摄物体表面的平均照度应 $\geq 50$  lux，且照度均匀度（最低照度/平均照度）应 $\geq 0.6$ 。

### 7.2.3 气流抗扰操作

当探测到活塞风速 $\geq 5$  m/s时，无人机应自动降低飞行速度至1 m/s以下或执行贴壁悬停策略，待气流稳定后再继续作业。

### 7.2.4 作业安全要求

7.2.4.1 失效保护逻辑：应将无人机的“失控保护策略”设置为“悬停”或“原地降落”，严禁设置为“自动返航”（RTH），以防止无人机在信号丢失后自动拉高撞击隧道顶部。

7.2.4.2 零配件管理：作业前后应严格清点无人机及挂载的零部件（如螺旋桨、电池卡扣、SD卡），确保无任何异物遗留在隧道轨行区内。

7.2.4.3 人员站位：操作人员应位于无人机飞行方向的后方或侧后方，并在视距范围内保持对无人机的监控，不应在无人机正下方或正前方穿行。

7.2.4.4 防尘防爆：在粉尘浓度较高的打磨作业面附近巡检时，无人机电机应具备防爆或防积尘能力，避免电火花引发安全事故。

### 7.3 边坡与防护区作业技术要求

#### 7.3.1 三维地形跟随

严禁使用定高（AMSL）模式。应导入数字高程模型（DSM）或利用对地雷达实施仿地飞行，保持对地高度（AGL）恒定在50 m~80 m，高度控制误差 $\leq 2$  m。

#### 7.3.2 正射影像采集

7.3.2.1 姿态控制：在采集瞬间，机身横滚角（Roll）和俯仰角（Pitch）均应 $\leq 5^\circ$ ，以免造成正射影像几何畸变过大。

7.3.2.2 时段选择：宜选择太阳高度角 $\geq 45^\circ$ 的时段作业，以减少高大建筑物或树木在保护区内投下的长阴影遮挡。

#### 7.3.3 植被穿透测绘

7.3.3.1 扫描方式：宜采用重复扫描或往复扫描路径。

7.3.3.2 点云特性：在植被覆盖率 $>80\%$ 的区域，激光脉冲发射频率宜 $\geq 300$  kHz，且必须开启多回波（ $\geq 3$ 回波）功能。

#### 7.3.4 作业安全要求

7.3.4.1 高压线避让：在城市轨道交通外部电源引入线（架空高压线）区域作业时，应保持至少30 m的电磁干扰安全距离，或在目视观测员的辅助下飞行。

7.3.4.2 隐私合规：在邻近居民楼的防护区作业时，不应采集与巡检任务无关的居民室内影像，拍摄角度宜调整为垂直向下或背向居民楼方向。

7.3.4.3 火灾防范：夏秋季干燥天气下，不应在杂草丛生的边坡区域进行低空（ $<5$  m）快速机动飞行，防止电机过热或坠机引发植被火灾。

7.3.4.4 断链处置：当图传信号受地形遮挡中断时，无人机应具备自动爬升至安全高度（高于周边最高障碍物20 m）后返航的能力。

### 7.4 轨道与道床作业技术要求

#### 7.4.1 防模糊拍摄

7.4.1.1 快门速度：应根据飞行速度  $v$  和GSD设定。推荐快门速度 $\geq 1/1250$  s。

7.4.1.2 感光度（ISO）：在保证曝光的前提下，ISO宜 $\leq 800$ ，以减少噪点对扣件细微裂纹识别的干扰。

#### 7.4.2 精细化巡检策略

7.4.2.1 扣件检查：镜头垂直向下（ $-90^\circ$ ），航线位于两股钢轨中心正上方。

7.4.2.2 夹板/螺栓检查：建议增加两条侧视航线，镜头向内倾斜 $15^\circ\sim 25^\circ$ ，以拍摄钢轨腰部的螺栓细节。

#### 7.4.3 数据完整性

单次作业的断点续飞重叠区域应长度 $\geq 10$  m，确保接缝处扣件无遗漏。

#### 7.4.4 作业安全要求

7.4.4.1 天窗点限定：此类作业必须在行车调度命令批准的维修天窗点（非运营时段）内进行，严禁在列车运营时段进入轨行区上方。

7.4.4.2 异物防落：无人机机身及载荷应采用双重加固措施（如加装防脱绳、电池锁扣），防止震动导致电池或相机掉落在钢轨上造成短路或行车事故。

7.4.4.3 磁场干扰：起飞前应对指南针进行校准，并确认抗磁干扰指数正常。若钢轨产生的磁场导致罗盘异常，应立即切换至姿态模式并拉高脱离，不可强行作业。

## 7.5 接触网与供电系统作业技术要求

### 7.5.1 安全飞行包线

7.5.1.1 水平距离：无人机中心线距接触网带电体水平距离应 $\geq 2.5$  m。

7.5.1.2 垂直高度：无人机宜高于接触网支柱顶端2 m以上进行俯视拍摄，或低于接触线1.5 m进行仰视拍摄，严禁在接触网线索同层高度穿梭。

### 7.5.2 红外精准测温

7.5.2.1 发射率修正：对于铜质接触线夹，发射率应设为0.65~0.75；对于铝合金设备，设为0.85~0.90。

7.5.2.2 对焦确认：拍摄前必须确认红外图像边缘锐利。对于远距离小目标（如10 m外的线夹），宜开启“超分辨率”或“微距”模式。

### 7.5.3 关键部件特写

7.5.3.1 绝缘子：应覆盖伞裙上表面（积污）和下表面（裂纹），单只绝缘子在画面中像素数应 $\geq 200$  px。

7.5.3.2 开口销：拍摄分辨率应足以辨识开口销的张开角度，推荐 $GSD \leq 0.15$  cm/pixel。

### 7.5.4 作业安全要求

7.5.4.1 安全距离红线：DC 1500 V设备要求任何时刻，无人机与带电体的距离不应小于2.0 m；AC 25 kV设备要求任何时刻，无人机与带电体的距离不应小于3.0 m。

7.5.4.2 进出路径：无人机接近或飞离接触网时，应采用“水平进出”或“从下往上”的路径，严禁从接触网正上方垂直下降进入，以防气压计误差导致坠入线网。

7.5.4.3 悬挂物防缠绕：作业前应检查无人机机臂、起落架是否光滑，宜采用全封闭流线型机身设计，防止在近距离作业时钩挂接触网线索或吊弦。

7.5.4.4 感应电防护：作业人员在回收刚进行过带电巡检的无人机时，应先释放机身静电或佩戴绝缘手套，防止感应电压电击。

## 7.6 车站及附属设施作业技术要求

### 7.6.1 反光面对应

7.6.1.1 玻璃幕墙：拍摄角度应避开正对太阳反射光路，宜与玻璃面法线成 $15^\circ \sim 30^\circ$ 夹角。

7.6.1.2 偏振镜使用：在强光下检查内部结构（如透过玻璃看雨棚龙骨）时，应加装偏振镜（CPL）并旋转至最佳消光角度。

### 7.6.2 屋面防水检查

7.6.2.1 重叠率：屋面平坦区域航向重叠率 $\geq 60\%$ ，但在天沟、女儿墙转角处应增加局部环绕拍摄。

7.6.2.2 缺陷标注：发现积水区域时，应记录积水面积及周边排水口的堵塞情况。

### 7.6.3 作业安全要求

7.6.3.1 人群避让：在车站出入口或广场区域作业时，应避开早晚高峰人流密集时段。若必须作业，应在地面设置警戒隔离区，范围半径不小于飞行高度的1.5倍。

7.6.3.2 防强风切变：在车站风亭、冷却塔或高楼夹缝处作业时，应预留足够的动力冗余，以应对突发的狭管效应大风或紊流。

7.6.3.3 玻璃幕墙防撞：启用视觉避障功能时，应确认避障系统对高反光玻璃表面的有效性。若无效，应关闭视觉避障并完全依赖RTK坐标及目视飞行，且保持5 m以上安全距离。

## 7.7 车辆段与场区巡检技术要求

### 7.7.1 电磁环境规避

- 7.7.1.1 严禁在车辆段试车线高压电缆沟正上方1 m范围内低空悬停。
- 7.7.1.2 起降点应距离车辆段微波通讯塔或大功率无线电发射塔 $\geq 50$  m。

### 7.7.2 库内无 GPS 作业

- 7.7.2.1 光照辅助：库内飞行时，若自然光照不足 ( $< 15$  lux)，应开启库房照明或机载补光灯。
- 7.7.2.2 特征匹配：飞行路径宜沿着地面明显的标志线（如安全通道黄线）或轨道走向，以辅助视觉定位系统锁定特征。

### 7.7.3 夜间周界巡逻

- 7.7.3.1 热像灵敏度：热像仪温差灵敏度（NETD）应 $\leq 50$  mK。
- 7.7.3.2 报警阈值：人体识别的温度报警阈值宜设定为 $35^{\circ}\text{C}$ （视环境温度动态调整），并开启移动侦测功能。

### 7.7.4 作业安全要求

- 7.7.4.1 调车作业联控：作业期间，现场指挥员应与车辆段信号楼（DCC）保持实时通信，确认识别试车线列车动态及调车作业计划。当有列车移动时，无人机应立即悬停避让或降落。
- 7.7.4.2 电磁环境监测：在靠近微波塔、TETRA基站或车辆段变电所区域，应实时监控链路信号强度（RSSI）；当信号强度急剧下降 ( $< -90$  dBm) 时，应立即返航。
- 7.7.4.3 禁飞区设置：应将车辆段周边的易燃品库、高压配电室及信号楼核心机房设置为电子围栏禁飞区，严禁无人机穿越。
- 7.7.4.4 人员防护：库内作业时，由于噪音叠加效应，现场操作人员应佩戴安全帽及护目镜，防止螺旋桨破碎伤人。

## 8 检测验证与试验方法

### 8.1 系统性能与飞行测试方法

#### 8.1.1 抗风能力测试

- 8.1.1.1 场地：选择具备稳定自然风的室外场地或专业风洞实验室。
- 8.1.1.2 方法包括：将无人机悬停于测试点，高度5 m；使用风速仪记录风速，当风速达到 $10.8$  m/s（6级风）时，保持悬停60 s；指挥无人机进行水平机动和自旋。
- 8.1.1.3 判定：若无人机姿态保持稳定，无翻滚、掉高，且航迹偏差小于 $\pm 1.0$  m，则判定合格。

#### 8.1.2 续航时间测试

- 8.1.2.1 配置：无人机搭载标准任务载荷，电池充满电。
- 8.1.2.2 方法包括：起飞至10 m高度悬停（或按经济巡航速度飞行）；记录从起飞时刻至系统发出二级低电量报警（或强制降落）时刻的时长。
- 8.1.2.3 判定：记录时长 $\geq 20$  min为合格。

#### 8.1.3 悬停与定位精度测试

- 8.1.3.1 方法包括：在地面设置一明显标志点，测定其精确坐标（基准值）；无人机使用RTK模式起飞，在标志点正上方20 m处悬停；记录无人机日志中的定位数据（频率 $\geq 1$  Hz），持续统计5min；
- 8.1.3.2 计算：计算记录坐标与基准坐标的均方根误差（RMSE）。
- 8.1.3.3 判定：水平 RMSE $\leq 0.1$  m，垂直 RMSE $\leq 0.1$  m为合格。

### 8.2 特定场景适应性验证

### 8.2.1 隧道环境飞行验证

8.2.1.1 条件：选取无 GNSS 信号的地铁隧道或室内模拟场。

8.2.1.2 方法包括：关闭或屏蔽无人机GPS模块，启用视觉/激光辅助定位；控制无人机沿中线飞行100 m并悬停；测量悬停位置与预定目标点的偏移量；模拟灯光全灭（照度< 1 lux），开启机载补光灯，观察定位是否丢失。

8.2.1.3 判定：100 m飞行累积漂移≤0.3 m；暗光环境下能维持稳定悬停且不发生漂移或撞墙，为合格。

### 8.2.2 强电磁环境适应性验证

8.2.2.1 条件：选取DC 1500 V或AC 25 kV接触网带电区域（或高压试验大厅）。

8.2.2.2 方法包括：无人机飞至距带电体2.5 m处悬停（保持安全余量）；观察地面站罗盘干扰读数及飞控姿态数据；保持悬停30 s，观察是否有航向突变或不可控漂移。

8.2.2.3 判定：罗盘模值波动在允许范围内，且未触发磁罗盘异常报警，飞行姿态可控，为合格。

### 8.2.3 线性障碍物避障验证

8.2.3.1 条件：设置直径10 mm的缆线作为障碍物。

8.2.3.2 方法包括：无人机以2 m/s速度正对缆线飞行；观察无人机是否在距缆线2 m（设定安全距离）外自动减速并悬停。

8.2.3.3 判定：成功识别并悬停，且未发生触碰，为合格。

### 8.2.4 AI 缺陷识别率验证

8.2.4.1 样本准备：准备包含不少于100张典型缺陷（如鸟巢、开口销缺失、绝缘子破损）的验证图集，其中正样本（有缺陷）不少于50张。

8.2.4.2 方法：将图集导入信息系统进行自动分析。

8.2.4.3 计算包括：检出率P按照式（8-1）进行计算；误报率E按照式（8-2）计算。

$$\text{检出率}P = \frac{\text{检出缺陷数}}{\text{实际缺陷总数}} \times 100\% \quad (8-1)$$

$$\text{误报率}E = \frac{\text{误报缺陷数}}{\text{检出缺陷总数}} \times 100\% \quad (8-2)$$

8.3.4.4 判定：P≥90%且E≤10%为合格。

## 8.3 测试报告

测试报告样式参见附录A。

## 9 应急处置

### 9.1 飞行异常处置

#### 9.1.1 通信链路中断

当无人机与地面站之间的遥控链路或数据链路意外中断时，应根据作业场景自动执行以下策略：

9.1.1.1 开阔区域（高架/场区/保护区）：若满足视距内飞行条件，系统应尝试自动重连；若超过3 s未重连，无人机应自动升高至预设的安全返航高度（应高于周边最高障碍物20 m），并直线返航至起飞点。

9.1.1.2 受限空间（隧道/桥下/库内）：严禁执行“升高返航”策略；无人机应保持当前位置悬停，尝试重连10s；若仍无法重连，应执行“原路回溯”或“原地缓慢降落”策略，降落过程应利用避障系统避开轨面及水沟。

### 9.1.2 卫星定位失效

当受到接触网电磁干扰或建筑物遮挡导致GNSS信号丢失（进入ATTI模式）时：

9.1.2.1 操控介入：操控员应立即接管飞行控制，通过FPV画面或目视观察判断无人机姿态。

9.1.2.2 辅助定位：应立即启用视觉定位或激光雷达辅助定位功能，维持悬停稳定性。

9.1.2.3 脱离干扰：应控制无人机向远离干扰源（如变电所构架、高压线缆）的方向移动，或升高高度，直至卫星信号恢复。

9.1.2.4 终止任务：若信号无法恢复且目视飞行困难，应立即寻找最近的安全平坦区域迫降。

### 9.1.3 动力与电池异常

9.1.3.1 低电量报警：对于一级报警（剩余电量20%~30%），应立即停止当前巡检任务，沿最短路径返航；对于二级报警（剩余电量10%~15%）：无人机将强制降落。操控员应修正降落点，确保不落在轨行区、道岔或接触网设备上，宜选择路基侧沟、检修通道或绿化带作为迫降点。

9.1.3.2 动力缺失：若单桨失效或电机停转导致姿态失稳，应立即向远离线路的方向满杆推舵，尽最大努力使无人机坠落在各行车限界以外的区域。

## 9.2 侵入与撞击处置

### 9.2.1 侵入建筑限界

当无人机因气流扰动或操作失误意外侵入城市轨道交通建筑限界（Gauge）内，且此时有列车接近时应做出以下行动：

9.2.1.1 紧急避让：操控员应立即全速拉升高度或向侧向水平飞离，迅速脱离限界范围。

9.2.1.2 紧急停机：若无法及时脱离且存在与列车驾驶室相撞的风险，应果断触发“空中停车（桨叶停转）”功能，使无人机垂直坠落，宁可损坏设备也要避免撞击高速运行的列车挡风玻璃。

### 9.2.2 坠入轨行区

若无人机坠落在轨道、道床或接触网上，作业组应立即按以下流程处置：

9.2.2.1 信息通报：立即通过专用电话向行车调度中心（OCC）或车站综控室报告，通报内容应包括：坠落时间、精确位置（公里标/百米标）、坠落物大小及是否挂在接触网上。

9.2.2.2 严禁擅入：在未获得调度中心批准及未办理封锁停电手续前，任何人员严禁擅自进入轨行区捡拾无人机。

9.2.2.3 配合处置：配合运营单位进行现场确认。若无人机挂在接触网上，应申请接触网停电挂地线后，由专业接触网工进行摘取。

## 9.3 环境突发事件处置

### 9.3.1 突发恶劣天气

9.3.1.1 强风：高架段作业遭遇突发阵风（ $>10\text{ m/s}$ ）时，应立即降低飞行高度至距桥面2 m以内（利用桥梁结构挡风），并缓慢返航；

9.3.1.2 暴雨：作业中突遇降雨，应立即停止任务。若雨势较大影响视线，应就近寻找高架桥下或车站雨棚下临时躲避降落。

### 9.3.2 人为干扰

在车辆段或保护区作业遭遇不明信号干扰（如反无人机枪）导致控制不畅时，应尝试切断视频传输以增加遥控信号带宽，并降低高度利用建筑物遮挡信号，尽快返航。

附录 A  
(资料性)  
测试报告

试验对象	
试验依据	
试验环境数据	
各单项测试数据记录、截图及结论	
试验人员签字及测试日期	

---