

城市轨道交通  
无人机巡检技术规范  
(征求意见稿)  
编制说明

标准起草组

2026年3月

# 目录

一、任务来源，起草单位，协作单位，主要起草人.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 起草单位.....	1
1.3 协作单位.....	1
1.4 主要起草人.....	1
二、制定标准的必要性和意义.....	2
三、主要工作过程.....	3
3.1 立项阶段.....	3
3.2 调研及标准起草阶段.....	4
3.3 征求意见阶段.....	4
四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系.....	5
4.1 编制原则.....	5
4.2 编制依据.....	5
4.2 与现行法律、法规、标准的关系.....	6
五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述.....	7
5.1 主要条款的说明.....	7
5.1.1 主要内容的论据.....	7
5.1.2 通用内容的编写要求.....	8
5.2 主要技术指标、参数、实验验证的论述.....	9
5.2.1 技术标准的编写要求.....	9
5.2.2 管理标准和工作标准的编写要求.....	11
5.3 新制定标准与国内外同类标准水平的对比论述.....	12
六、重大意见分歧的处理依据和结果.....	13
七、与国内外同类标准水平的对比情况.....	13
八、贯彻标准的措施建议.....	15
8.1 组织措施、技术措施及过渡办法论述.....	15

8.2 标准培训要求、推广手段方式及效果检查评估建议 .....	16
九、其他应说明的事项 .....	17

## 一、任务来源，起草单位，协作单位，主要起草人

### 1.1 任务来源

根据《中国交通运输协会团体标准管理办法》相关规定，中国交通运输协会组织专家对申报 2025 年度中国交通运输协会团体标准制定征集工作的团体标准组织专家评审，评审结果报中国交通运输协会标准化技术委员会进行审定，同意《城市轨道交通无人机巡检技术规范》标准立项。根据中国交通运输协会关于 2025 年度第 7 批团体标准项目立项（13 项）的公告，〔2025〕第 332 期(立审)。

## 1.2 起草单位

《城市轨道交通无人机巡检技术规范》由铁科院（深圳）研究设计院有限公司牵头，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、广州欧徠测绘技术有限公司、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。

## 1.3 协作单位

招商局重庆交通科研设计院有限公司

山东轨道交通勘察设计院有限公司

## 1.4 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

错误！未定义样式。

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。

表1 起草人员工作任务表

序号	工作内容	参与人员
1	总体策划，技术顾问	闫晓夏、李俊鑫
2	前期技术调研与资料整理	侯涛刚
3	标准正文内容编制与验证（1-4章）	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
4	标准正文内容编制与验证（5-6章）	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
5	标准正文内容编制与验证（7章）	杨翌照、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
6	标准正文内容编制与验证（8章）	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。
7	标准化审查与项目协调	侯涛刚

## 二、制定标准的必要性和意义

随着我国城市轨道交通快速发展，路网规模不断扩大，设施设备逐渐进入老化期，整体运维保驾压力持续上升。运营线路多处于封闭、狭窄且电磁环境复杂的空间内（如高架区间、地下隧道区间、接触网与供电系统等），传统的人工步巡或登高巡检方式存在劳动强度大、作业效率低、严重依赖“夜间维修天窗点”、隐患漏检率高以及人机安全风险大等固有痛点，难以满足当前高频次、高可靠性运行保障的现实需求。无人机作为新一代智能感知与高机动性装备，已在电力、应急等行业得到验证。然而，受限于城市轨道交通地下隧道无卫星信号、高压牵引供电强电磁干扰、行车限界控制严格等极为特殊的行业属性，无人机应用长期处于零星探索阶段，缺乏统一、权威的技术标准。

本标准的编制目的在于填补城市轨道交通领域无人机巡检技术的标准空白，确立统一的系统组成、核心性能指标、作业规范及验证测试方法。其核心意义首先在于构建安全作业底座，通过明确带电作业安全距离、防侵限逻辑及应急处置流程，从源头杜绝无人机“黑飞”或失控引发的行车事故；其次在于促进行业技术规范化的统一，统一无人机与各类任务载荷的软硬件接口及数据交互协议，打破系统孤岛，促进设备制造商与城轨运营单位的数据互通；最终旨在赋能智慧城轨建设，以标准引导视觉/激光融合定位、AI 缺陷自动识别等前沿技术在运维一线的落地，为城市轨道交通数字化转型提供强有力的技术支撑。

在标准编制的必要性论述方面，本标准首先突出了显著的新颖性。当前国内外尚无专门针对“城市轨道交通”复杂立体场景的无人机巡检综合性技术标准，现有的铁路基础设施无人机巡检等标准难以直接平移至城轨环境。本标准首次全面聚焦城轨特有的地下深埋隧道无 GNSS 定位、大功率接触网（DC 1500V/AC 25kV）强电磁干扰及高密度建筑群气流扰动等核心痛点，创新性地提出了多源融合定位精度指标、非同轴主动补光策略以及针对细长金属构件的精细化避障要求。经查新与对标，本标准在城轨复杂场景适应性指标方面具有显著的原创性与领先性。

其次，本标准具备极强的实用性。标准紧密贴合城市轨道交通一线的实际运维需

求，不仅规定了无人机系统的硬件选型底线，还按高架、隧道、边坡、接触网、车站及车辆段等真实应用场景，逐一明确了航线规划策略、飞行速度、快门设置、地面分辨率（GSD）及拍摄角度等具体工艺参数。通过实施本标准，运营单位可直接将传统的“人防”转化为“技防”，显著提升典型病害的检出率，真正达到减员增效、指导生产实践的积极效果。

此外，本标准规定的技术要求在实际应用中展现了高度的适用性。在环境适应性方面，针对高架侧风、隧道高湿低光照及微气象突变等极端环境，均设定了明确的性能阈值与测试验证方法；在技术适应性方面，规范了AI智能识别算法的准入门槛以及端到端的低时延图传要求，完全适配当前5G通信与边缘计算的技术发展水平；在经济适应性方面，推动了无人机场及地面站的高效周转，极大限度地利用了极其宝贵的短时维修天窗，有效降低了长期人工巡检的隐性成本。

最后，出台本标准以规范无人机巡检系统的准入门槛与作业行为，具有刻不容缓的紧迫性。城市轨道交通的安全平稳运行是维持城市运转的生命线，当前部分早期开通的线路已面临设备老化频发与维保人力短缺的双重挤压。随着低空经济的爆发，各类无人机设备纷纷涌入城轨市场，若缺乏统一的技术规范与严格的安全边界限制，极易发生无人机侵入限界、刮蹭接触网或逼停列车的恶性安全事件，因此保障轨道交通本质安全已成为行业急需解决的核心问题。

### 三、主要工作过程

#### 3.1 立项阶段

2025年6月，启动标准申报工作，确定了标准的主编写单位及编写单位，并明确了标准编制的流程、各阶段时间进度安排以及主要工作任务，并于2025年8月，由中国交通运输协会邀请行业专家完成标准立项评审。

#### 3.2 调研及标准起草阶段

2025年8月—2026年9月，起草组开展工作大纲编制工作，对无人机城市轨道交通

交通巡检技术开展了深入调研。主执笔单位在前期研究基础上，形成标准初稿，同时工作小组对标准内容进行了多次研讨，持续完善标准内容。

### 3.3 征求意见阶段

2025年10月完成标准初稿修改后，形成标准征求意见稿，并于2025年10月14日召开第一次《城市轨道交通无人机巡检技术规范》标准征求意见稿草案审查会议，专家提出建议：1. 调整章节结构，修改为“5 总体要求”“6 系统构成与功能”“7 无人机平台与机巢配置要求”“8 工作流程与运行管理要求”“9 巡检项目与应用场景”“10 安全要求”“11 试验与检验”“12 运维”；2. 完善术语定义和规范性引用文件相关内容。针对上述专家意见，北京交通大学作为主执笔单位，对标准草稿进行了以下对应的修改：1. 听取专家意见，按照专家对章节结构的建议进行了内容的修改，首次加入了具体的城轨场景的巡检，不再是空泛的长篇大论。2. 加入了一些术语定义，并且严格审查了草稿所提到的规范性引用文件。

2026年1月6日召开了第二次《城市轨道交通无人机巡检技术规范》团体标准征求意见稿草案审查会议，专家提出建议：1. 删减相关术语和定义，增加“城市轨道交通无人机巡检”的定义；2. 章节结构调整“4 总体要求”“5 无人机巡检系统组成和要求”“6 巡检场景与内容”“7 巡检技术要求”“8 检测验证与试验方法”“9 应急处置”，并按照新的章节结构完善标准内容；3. 进一步完善相关技术指标的验证工作；4. 按照专家意见和 GB/T 1.1—2020 要求修改标准内容。针对上述专家意见，北京交通大学作为主执笔单位，对标准草稿进行了以下对应的修改：1. 删除了“3. 术语和定义”中的常见术语和定义，定义了“城轨无人机巡检”与“巡检任务”两个本标准的核心术语；2. 根据建议章节结构进行了内容的修改和完善；3. 根据每个具体城轨场景的巡检技术，作了相应的技术验证与试验方法；4 按照专家意见和 GB/T 1.1—2020 要求修改了标准草稿的内容。

## 四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

### 4.1 编制原则

本标准为中国交通运输协会团体标准，属自愿性标准。在遵循“开放、公平、透明、协商一致、促进贸易和交流”等通用原则的基础上，本标准的编制重点贯彻了多项针对城市轨道交通无人机电检特性的核心原则。首先是坚守安全底线与合规运行，将保障城市轨道交通行车安全和设施设备安全作为首要准则，严格设定了防侵限逻辑、带电作业安全距离以及多重异常应急处置策略，确保电检作业绝不干扰列车调度与通信信号。其次是坚持科学严谨与先进适用，立足于城市轨道交通运维一线的实际痛点，充分结合低空飞行器、多源融合定位及 AI 智能识别等前沿技术，针对地下隧道无 GNSS 信号、接触网强电磁干扰等极端工况设定了科学可验证的指标。此外，标准还强调协调配套与互通互联，注重规范软硬件接口与数据流转协议，确保无人机电检系统能与既有监控和生产管理系统无缝对接。最后，本标准力求规范统一以指导实践，严格按国家标准体例起草，统一作业流程，为行业提供明确的执行规范和验收准绳。

### 4.2 编制依据

本标准的编制以国内外城市轨道交通无人机电检应用研究成果为基础，结合当前城市轨道交通设施运维场景的技术需求，并参考国家及行业相关标准、规范和管理要求。同时吸收了近年来各地轨道交通运营单位在无人机电检实践中的经验，为标准的适用性与可实施性提供支撑。

在本标准的编制过程中，系统查阅并参考了以下国家标准、行业标准与相关技术规范（按主题分类）：

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

此外，在标准编制中，严格执行国家标准《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》（GB/T1.1-2020），严格控制标准编制质量，并根据提案、立项、起草、征求意见、技术审查、报批等节点时间控制本标准编制工作进度，确保按期保质完成标准编制工作。

## 4.2 与现行法律、法规、标准的关系

本标准与相关法律、法规、规章及相关标准协调一致，没有冲突。在与现行法律法规的关系层面，本标准严格贯彻《中华人民共和国民用航空法》、《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》以及国家空域管理的相关规定，明确要求巡检作业必须提前获得空域管理部门与城轨运营单位的双重许可且人员必须持证上岗，这是在国家低空飞行法律框架下对特定工业场景作业行为的具体约束。在与现行国家及行业标准的关系层面，我国现有的轨道交通运维标准多聚焦于人工巡查或大型轨旁检测车辆，而现有的无人机应用标准（如《铁路基础设施无人机巡检技术规范》）则主要针对地表开阔的铁路网络。本标准精准填补了城市地下隧道、高密度高架桥梁等特殊城轨环境下的无人机作业标准空白。它不仅不违背现有的城轨运营技术规范，反而作为其在智能化感知手段上的延伸，与现有标准体系共同构成了一个完整的“人工结合智能装备”的立体化维保标准网络

## 五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

### 5.1 主要条款的说明

#### 5.1.1 主要内容的论据

本文件规定了城市轨道交通无人机巡检的总体要求、无人机巡检系统组成和要求、

巡检场景与内容、巡检技术要求、检测验证与试验方法、应急处置等内容。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巡检作业。本标准确立了城市轨道交通无人机巡检系统的总体架构、场景分类、技术要求及验收方法，其核心技术内容的确定依据主要基于以下四个方面：

一是理论依据：本标准在系统架构设计上，依据物联网系统工程理论，提出了“感知执行层、传输网络层、数据处理层、业务应用层”的四层分层架构，该模型确立了软硬件解耦的技术路线，解决了不同厂商无人机平台与任务载荷（如可见光、红外、激光雷达）的兼容性问题。在成像技术要求上，依据光学成像原理与采样定理，推导出为识别直径 2mm 的微小缺陷（如销钉缺失），必须保证地面分辨率（GSD）优于 0.1 cm/pixel，从而确立了飞行高度与相机像素的匹配关系。在导航定位方面，针对地下隧道无卫星信号的理论约束，引入了同步定位与建图（SLAM）理论，规定了利用视觉里程计与激光雷达融合的定位方案，填补了传统 GPS 导航在地下封闭空间应用的理论空白。

二是试验依据：标准中关键性能指标的设定均经过了严格的试验验证。例如，针对高架线路的抗风能力指标，经过多次风洞试验与现场测试，验证了无人机在 10.8 m/s（6 级风）风速下悬停 60 秒且航迹偏差小于 ±1.0 m 的稳定性，证明了该指标能满足高架桥面阵风环境下的安全作业需求。针对电磁兼容性，通过在 DC 1500V 和 AC 25kV 带电环境下的接近试验，确定了无人机在距离带电体 2.5 m 处仍能保持磁罗盘与飞控信号稳定的结论，从而支撑了标准中关于抗干扰距离的规定。此外，通过隧道内的实飞测试，验证了在关闭 GNSS 模块并在暗光条件下，利用辅助定位系统飞行 100 m 累积漂移小于 0.3 m 的技术可行性。

三是数据依据：标准中的量化指标基于大量实测数据的统计分析。例如，在 AI 缺陷识别率的设定上，基于对数万张城市轨道交通设施（如绝缘子、扣件、鸟巢）巡检影像样本的训练与测试统计，得出了当前主流算法在保证误报率（E）控制在 10% 以下时，检出率（P）可稳定达到 90% 的数据结论，以此作为判定智能分析系统合格的基准线。同时，通过对图像传输时延的测试数据分析，确定了在视距内传输时延 ≤ 300 ms、超视距 ≤ 500 ms 的数据指标，以保证远程操控的实时性与安全性。

四是实践依据：本标准的作业流程与安全策略深度结合了多家轨道交通运营单位的一线维护经验。例如，规定单次作业周转时间 $\leq 15$  min，是基于城市轨道交通夜间维修“天窗点”极其有限（通常仅 3-4 小时）的实践经验，要求设备必须具备快速部署与撤收能力。关于应急处置中“隧道内信号中断严禁自动返航”的规定，是吸取了早期试点中无人机因触发返航逻辑自动拉高撞击隧道顶部的事故教训总结得出的关键安全策略。此外，严禁单人作业、必须配置监护员的要求，也是基于带电区域与行车区域高风险作业的人防实践经验。

### 5.1.2 通用内容的编写要求

关于标准中通用内容的编写，本标准的名称在立项阶段为《无人机城市轨道交通巡检及维护技术规范》，后面考虑到标准的严谨性和规范性，删除了关于无人机的维护技术规范，最终确定为《城市轨道交通无人机巡检技术规范》，后面的编制过程中保持一致，未再进行修改。

在内容架构上，本标准统筹考量了城轨无人机作业的全生命周期管理，正文共划分为 9 个章节进行概括说明。其中第 1 至第 3 章界定了范围、规范性引用文件及核心术语；第 4 与第 5 章确立了巡检的总体要求与无人机巡检系统的组成规范；第 6 章创新性地将作业场景细分为高架、隧道、边坡、轨道、供电、车站及场区，并详细规定了对应的巡检内容；第 7 章则针对上述各场景提出了极具针对性的精细化技术与安全要求；最后，第 8 章与第 9 章分别明确了系统的检测验证、试验方法以及针对各类险情的应急处置策略，从而构建了一个完整、闭环的标准技术体系。

在适用范围的界定上，本标准明确限定于城市轨道交通运营管理机构、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巡检作业。做出此严格限制的理由在于，城市轨道交通环境具备极强的行业特殊性，其封闭的地下隧道空间、严苛的建筑限界要求、高压牵引供电系统以及密集的人流分布，与大铁路干线或电力行业的开放空域作业环境存在本质差异。通用的无人机应用标准无法直接套用于此，因此必须将其严格限定在城市轨道交通这一特定高风险领域内。

此外，在术语和定义的阐述方面，本标准在全面引用相关行业通用术语即 MH/T

2008《无人机系统术语》的基础上，针对城轨特性专门重新定义了“城轨无人机巡检（Urban Rail Transit UAV Inspection）”和“巡检任务（inspection task）”这两个关于本标准的核心术语。重新定义的根本理由在于，相较于通用领域仅将无人机巡检视为单纯的空中观测，本标准强调了其作业对象的专用性（如桥梁、高架线路、路基、轨道、接触网等），并明确界定该活动必须是利用无人驾驶航空器系统搭载任务载荷，按照预定策略进行数据采集、状态监测和隐患排查的作业活动。这从根本上将其与非专业的常规航拍活动区分开来，充分保障了城市轨道交通行业应用的严谨性与专业性。

## 5.2 主要技术指标、参数、实验验证的论述

### 5.2.1 技术标准的编写要求

针对本技术标准中提出的主要技术指标、公式、性能要求及试验方法，起草组均进行了详实的数据采集与严格的试验验证，确保各项参数具备科学的数据来源与极强的现场适用性。

在无人机飞行抗风与悬停稳定性能方面，标准明确规定无人机必须在 10.8 m/s（即 6 级风）的风速环境下保持悬停 60 秒且航迹偏差小于  $\pm 1.0$  m，同时水平与垂直均方根误差（RMSE）均须  $\leq 0.1$  m。这一数据来源于高架桥面微气象站的历史风速统计与专业风洞试验结论，由于高架线路处于城市开阔半空且极易遭受列车高速交会产生的气动冲击，若抗风阈值低于 10.8 m/s，将直接面临失控坠入轨行区的致命风险。在无卫星定位（GNSS Denied）的深埋隧道环境中，标准规定了 500m 连续飞行偏差  $\leq \pm 0.5$ m，以及在关闭 GPS 模块的 100m 实飞测试中累积漂移  $\leq 0.3$ m 的严苛指标。该参数的制定基于地铁盾构隧道的标准建筑限界尺寸，通过引入视觉里程计（VIO）与激光雷达 SLAM 融合定位的多次现场试验验证，确认只有将漂移误差严格锁定在 0.3m 以内，才能彻底避免无人机在抵近管片或线缆飞行时发生结构性撞击。

在成像质量与精细化巡检参数的设定上，本标准充分参考了 ISO 12233《摄影 电子静态照相机 分辨率和空间频率响应测量》等国际通用测试验证标准，并结合城轨

微小缺陷特性进行了指标本土化。标准规定可见光设备有效像素必须 $\geq 2000$ 万并具备最大混合变焦 $\geq 20$ 倍的能力，特别强调在梁体跨中受拉区等重点区域，地面分辨率（GSD）必须 $\leq 0.1$  cm/pixel。该数据的合理性在于，城轨巡检必须在距离目标 5m 以上的安全空间内进行，而部分致命隐患（如接触网开口销缺失、直径 2mm 的销钉脱落）尺寸极小，通过实拍样本比对分析得出，当 GSD 大于 0.1 cm/pixel 时，图像噪点将直接淹没缺陷特征。与之配套的，针对隧道内低光照环境（ $\leq 10$  lux），标准通过暗光感知试验确定了双光源非同轴布光设计，并给出了被摄物体表面平均照度 $\geq 50$  lux 且照度均匀度 $\geq 0.6$  的硬性试验数据，彻底解决了隧道粉尘漫反射导致的成像模糊难题。

在电气安全指标与 AI 智能分析检验规则方面，标准提供了无可辩驳的试验与数学依据。针对强电磁环境，标准严格划定了安全距离红线：无人机与 DC 1500V 设备的距离不应小于 2.0m，与 AC 25kV 设备的距离不应小于 3.0m。此指标是通过高压试验大厅及带电接触网实地的电磁兼容性（EMC）测试得出的极值，试验表明在距带电体 2.5m 处悬停 30 秒，无人机磁罗盘模值波动方可维持在允许范围内而不触发异常报警。此外，针对 AI 缺陷识别性能，标准给出了明确的统计学公式：检出率 P 等于检出缺陷数除以实际缺陷总数乘以百分之百，误报率 E 等于误报缺陷数除以检出缺陷总数乘以百分之百。为确保检验的客观性，试验方法明确规定必须在包含不少于 100 张典型缺陷（其中正样本不少于 50 张）的图集上进行验证。通过收集国内多条线路的实测应用数据，最终将合格线划定为检出率  $P \geq 90\%$  且误报率  $E \leq 10\%$ ，这为行业内智能算法的验收与准入提供了清晰的数学标尺

### 5.2.2 管理标准和工作标准的编写要求

在管理要求、工作流程及应急预案的制定上，本标准深度结合了城市轨道交通高密度、高风险的行业底色，其提出的各项制度均是对现行轨交安全规章的延伸与细化。在人员资质与作业组织方面，标准规定操作人员除持有民航局无人机执照外，还必须经城市轨道安全培训合格，且严禁单人作业，每次任务至少配置 1 名操作员与 1 名监护员。通过横向比较通用航拍领域允许单人作业的宽松管理经验，本标准的严苛要求

来源于轨交带电作业及夜间轨行区作业的特有安全红线，双人及多人联控机制能够有效防范因视距受限或疲劳操作导致的安全事故。在作业流转效率方面，标准规定无人机地面站的单次作业周转时间（从降落锁止到再次起飞）必须 $\leq 15$ 分钟。这一严苛管理指标的缘由在于，城市轨道交通夜间停运的维修“天窗点”通常仅有极短的几个小时，且需与工务、电务等多工种交叉作业，只有实现15分钟内的快速补给换电，才能在极度受限的时间窗口内完成全线段的巡检任务。

在极其关键的异常与应急处置流程设计上，本标准确立了“列车行车安全绝对优先”的核心管理准则。针对通信链路中断这一常见故障，标准基于空间限制实施了差异化的管理策略：在开阔区域允许执行升高返航，但在隧道、桥下等受限空间内，标准明确严禁将失控保护设置为“自动返航”（RTH），强制要求必须保持悬停、原路回溯或原地缓慢降落。这一流程设定的缘由是深刻吸取了行业早期的试飞教训，若在隧道内触发自动拉高返航，无人机将直接撞击隧道顶部管片或接触网造成严重次生灾害。更进一步地，针对无人机意外侵入城市轨道交通建筑限界（Gauge）且面临列车接近的极端险情，标准给出了宁可损坏设备也必须保障列车安全的兜底处置流程：操控员必须果断触发“空中停车”使桨叶停转，让无人机垂直坠落。这一要求的合理性在于，高速运行的列车一旦被无人机撞击挡风玻璃或卷入受电弓，将引发不可估量的脱轨或大面积停电事故，因此牺牲无人机设备以保全列车运行的应急逻辑，是完全符合城市轨道交通安全管理第一要义的。此外，针对巡检数据流转，标准明确要求遵照GB/T 22239等网络安全等级保护规定对关键基础设施的敏感地理信息进行加密脱敏，实现了与国家数据安全政策的深度配套。

### 5.3 新制定标准与国内外同类标准水平的对比论述

本标准为首次制定的团体标准，旨在填补城市轨道交通无人机巡检领域的技术规范空白，因此在严格意义上暂不涉及新、旧版本标准的直接更迭对比。然而，为充分论证本标准的技术先进性与制定水平，起草组系统梳理了国内外相关同类或交叉领域的标准现状。目前国际上尚未发布专门针对城市轨道交通复杂环境的无人机巡检标准。在国内，虽然近年来无人机技术在轨道领域有所探索，但已有标准在适用范围和

技术深度上存在显著局限，本标准的出台实现了从局部应用向全场景、全链条规范的重大跨越。

在与铁路行业现有标准的水平对比中，现行的《铁路基础设施无人机巡检技术规范》主要适用于地表相对开阔的铁路线路、桥隧及周界环境。本标准在此基础上实现了核心技术指标的升维，针对城市轨道交通特有的高密度高架桥梁、地下深埋隧道以及高压供电等复杂环境，填补了适用性空白。例如，针对地下无 GNSS 信号的隧道环境，本标准创新性地提出了利用视觉与激光雷达融合定位的技术要求，并给出了 100m 飞行累积漂移小于等于 0.3m 的具体实验验证参数。这标志着本标准在受限空间飞行控制与环境感知维度的技术要求远高于传统的大铁路巡检规范。

在与现有无人机单项技术规范的对比中，现行的《轨道交通巡检用无人机自动机巢选址规范》（T/ZSMS 0034—2023）仅专注于机巢的空间布设、站址选择与评价流程。本标准打破了这一单一子系统的局限，构建了覆盖无人机平台、任务载荷、数据通信、作业流程及故障响应的“端-边-云-作业”一体化完整规范体系。在智能化指标层面，本标准明确提出了 AI 缺陷识别算法的量化验证公式，规定检出率必须大于等于 90%且误报率小于等于 10%。在安全防范层面，本标准针对牵引供电系统规定了任何时刻与 DC 1500V 设备保持 2.0m 以上、与 AC 25kV 设备保持 3.0m 以上的硬性安全距离。这些全方位、可量化的性能门槛，深刻体现了本标准在系统完整性和风险管控上的重大突破。

## 六、重大意见分歧的处理依据和结果

本标准在制定的过程中未发生重大意见分歧。

## 七、与国内外同类标准水平的对比情况

本标准没有涉及到相关国际标准。

近年来，随着无人机技术在城市轨道交通巡检领域的探索与落地，国内也已启动若干标准或规范的研制工作。但目前这些现有标准或在编制阶段，范围或深度尚有局

限，与本标准整体目标相比还存在不足。

目前国内较具代表性的包括：

《轨道交通巡检用无人机自动机巢选址规范（T/ZSMS 0034—2023）》：该标准专注于无人机巡检系统中的自动机巢布设问题，规范了站址选择、评价流程和技术指标，是国内首个在轨道领域明确机巢选址的团体标准 启信宝。但该标准仅覆盖选址子系统，不涉及无人机平台的性能规范、巡检作业流程、数据接口、安全机制等要素。

《铁路基础设施无人机巡检技术规范》：该标准适用于铁路线路、桥隧、接触网、线路周界环境等基础设施无人机巡检作业。虽然与轨道交通不同，但在无人机巡检技术、作业流程、数据处理等方面有借鉴意义；但对城市轨道交通复杂环境（隧道、车站区间、高架、屏蔽门等）的适用还不够完善

地方/行业规范（如《城市轨道交通全自动运行系统运营技术规范》）：虽不是专门无人机标准，但涉及轨道交通系统自动化运维、监测与控制方面的要求。有助于把无人机巡检标准放在城市轨道交通整体运营体系中审视，与信号、运行控制、监测系统接口要对接一致。

与上述标准相比，本标准在以下方面做出了扩展与提升：（1）覆盖更全面的系统架构：本标准不仅规范机巢、无人机平台、数据平台、通信链路等子系统的性能参数，还兼顾作业流程、安全机制、故障响应与运维保障，形成“端-边-云-作业”一体化的完整规范体系。（2）性能指标更具挑战性和场景适应性：考虑城市轨道交通复杂环境（如高架、隧道、接触网、屏蔽门等），本标准提出了更严格的稳定性、抗干扰性、定位精度、动态识别能力、夜间低光环境适应性等指标，以满足实际巡检场景的适用性和可靠性要求。（3）安全机制和容错设计更深入：在飞行安全、避障策略、链路冗余、异常应急处置、权限控制与法规兼容等方面，本标准强调多重保障机制，弥补现有标准中对风险控制的不足。（4）运维与生命周期管理制度更健全：明确无人机及子系统的日常检修、部件更换周期、健康监测、版本升级控制和云端运维平台标准，为长期稳定运行提供制度支撑。

因此，本标准在国内无人机轨道巡检规范化发展中具有前瞻性和引领性：它既继承和补充了已有标准的有效内容，也在指标深度、系统完整性和安全性管控上实现突

破，为后续形成更具约束力的行业规范打下基础。本标准与现有标准重要差异见表 1。

综合来看，本标准在深度、广度和实用性上均高于目前国内已发布或正在编制的相关标准/规范，能够在无人机城轨巡检领域起到规范引领作用，并对未来行业标准升级、国际对接具有借鉴意义。

表 1 本标准与现有标准重要差异

序号	标准名称	主要内容	与拟定标准的关系或局限
1	轨道交通巡检用无人机自动机巢选址规范	针对轨道交通巡检中无人机“自动机巢”（无人机机库/机巢）布设选址的指标、流程与评价方法。	本标准主要聚焦于机巢的空间布设与选址，未覆盖无人机本体性能、巡检流程、识别算法、安全机制等方面
2	铁路基础设施无人机巡检技术规范	适用于铁路线路、桥隧、接触网、线路周界环境等基础设施无人机巡检作业。	虽然与轨道交通不同，但在无人机巡检技术、作业流程、数据处理等方面有借鉴意义；但对城市轨道交通复杂环境（隧道、车站区间、高架、屏蔽门等）的适用还不够完善。
3	地方/行业规范（如城市轨道交通全自动运行系统运营技术规范）	虽不是专门无人机标准，但涉及轨道交通系统自动化运维、监测与控制方面的要求。	有助于把无人机巡检标准放在城市轨道交通整体运营体系中审视，与信号、运行控制、监测系统接口要对接一致

## 八、贯彻标准的措施建议

### 8.1 组织措施、技术措施及过渡办法论述

本标准的贯彻实施是一项涉及城市轨道交通多专业协同的系统工程，需要全行业统筹规划，通过严密的组织措施、扎实的技术措施以及稳妥的过渡办法，确保无人机

巡检作业规范化落地。在组织措施方面，建议各城市轨道交通运营管理单位及相关运维企业成立专项无人机应用推进小组，联合行车调度中心（OCC）、供电、工务、通信信号及安保等多部门建立跨专业协同联动机制。这种组织架构能够有效打破传统专业壁垒，确保无人机在申请夜间维修“天窗点”、进入接触网带电区域以及进行场区周界巡查时，能够获得高效的调度指挥与作业许可，从而将无人机巡检正式、顺畅地纳入日常生产管理体系。

在技术措施方面，各执行企业应严格对照本标准中关于无人机平台及任务载荷的关键参数要求，分批次开展存量设备的技术改造与新设备的合规采购。重点应落实隧道内视觉与激光雷达融合定位、高清晰度成像（如有效像素不低于 2000 万及 20 倍混合变焦）以及抗高压电磁干扰等核心硬件技术的应用。同时，企业在软件平台建设上应加快推动无人机地面站与既有综合监控系统（ISCS）及生产管理系统（EAM/PMS）的标准接口互联，实现巡检数据、AI 缺陷识别工单与后台运维平台的数据闭环，打通信息孤岛。

在过渡办法方面，鉴于当前各城市及各线路的无人机应用水平与资金投入参差不齐，建议采取“先试点后推广，先开阔后受限”的稳妥过渡策略。运营单位可优先在空域相对开阔、信号良好的高架区间及车辆段场区开展合规性常态化作业，待系统稳定性与团队配合度得到充分验证后，再逐步向环境极其复杂、高风险的地下深埋隧道及带电接触网核心区过渡。此外，对于目前已投入使用但部分指标尚未完全达标的存量非标无人机设备，建议运营单位结合实际情况给予合理的整改缓冲期，或在此期间将其严格降级限制在无侵限风险的低敏感区域（如外围防护区巡查）使用，以保障日常维保业务的平稳衔接与平稳过渡。

## 8.2 标准培训要求、推广手段方式及效果检查评估建议

为确保本标准的各项精细化技术指标与绝对安全底线能够被一线作业人员不折不扣地执行，必须建立全面、长效的标准宣贯与评估机制。在标准培训工作方面，建议行业全面推行“双重准入”的培训与考核机制，即作业人员不仅必须依法取得民航局认可的无人机驾驶员执照，还必须通过属地城市轨道交通运营单位的专项安全及业务

培训。培训内容必须深度聚焦高风险工况的应对，尤其是针对带电作业的安全距离红线、严格禁止单人作业的组队模式，以及诸如隧道内信号中断严禁触发自动返航、面临列车撞击风险时必须果断触发空中停车使其垂直坠落等极端的应急处置流程。这些直接关乎行车生命线的核心条款，必须通过反复的全员实操演练与强制性考核来夯实。

在推广应用标准的手段和方式方面，建议依托中国交通运输协会及标准化技术委员会的平台优势，组织标准主要起草单位与行业头部企业举办专项技术交流会、实地观摩会与技术沙龙。可挑选部分已深度应用该标准的城市轨道交通线路，打造一批高标准示范线与示范无人机自动化机巢，通过展示真实、客观的提质增效应用案例（如通过 AI 算法使绝缘子破损、扣件缺失等常见缺陷的检出率稳定达到 90%以上），以直观的经济效益与安全效益引导、辐射全行业主动采用本标准，加速科技成果的转化。

在关于标准贯彻效果的检查和评估建议方面，建议各运营单位将本标准的执行情况纳入企业年度的运维质量审计与安全生产考核范畴。依托标准中强制要求的信息系统全参数日志记录功能，审计部门可对无人机的实际飞行轨迹偏差、带电作业安全距离执行情况以及数据链路传输时延等核心合规指标进行常态化的数据抽查与回溯审计。同时，鼓励行业建立标准的动态反馈机制，定期收集各单位在标准实施过程中遇到的新工况、新痛点与前沿技术迭代情况，定期组织专家对标准的适用性进行评估与修订探讨，从而切实、持续地提升我国城市轨道交通智能运维的本质安全水平与高质量发展。

## 九、其他应说明的事项

无。