

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.02.018

# 无人机视频智能巡检系统 在跨座式单轨交通的应用

吴树强

(中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

**摘要:** 低空经济在城市轨道交通领域的研究正在快速发展壮大, 对于以跨座式单轨制式为代表的中低运量轨道交通制式, 根据低空经济的关键技术研究, 探究一种适用于跨座式单轨建设运营特点、满足运营要求、有效解决维修保养问题的低空无人机智能巡检系统是工程实际运维场景的需要。本文提出一种应用于跨座式单轨交通的基于无人机组平台的视频智能巡检系统, 分析其在跨座式单轨交通中的应用方案和价值, 为以高架敷设为主的中低运量轨道交通制式探索一种切实可行的低空经济应用场景, 在实现跨座式单轨制式轨道梁桥自动化巡检、降低运营人工巡检工作量和减少人工漏检等方面具有重要的指导意义。

**关键词:** 低空经济; 跨座式单轨; 视频数据; 应用场景; 智能巡检

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)02-0124-09

## Application Research of Unmanned Aerial Vehicle Video Intelligent Inspection System in Low-Altitude Straddle Monorail Transportation

WU Shuqiang

(China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055)

**Abstract:** The low-altitude economy has become a new industrial direction pursued in global competition due to its prominent features. The research on low-altitude economy in the field of urban rail transit is rapidly developing and growing. For the low and medium capacity rail transit systems represented by the straddle monorail system, based on the key technology research of low altitude technology, it is necessary to explore a low altitude unmanned aerial vehicle intelligent inspection system that is suitable for the construction and operation characteristics of straddle monorails, meets operational requirements, and effectively solves maintenance problems. This study proposes for the first time a video intelligent inspection system based on an unmanned aerial vehicle platform applied to straddle monorail transit, analyzes its application plan scheme and value in straddle monorail transit, and explores a practical and feasible low altitude-economic economy application scenario for the low and medium capacity rail transit systems mainly based on elevated laying structures. This approach is conducive to achieving the automation of straddle-type monorail transit track beam and bridge inspection. This approach is effective in Reducing the workload of manual inspections and minimizing manual omissions has significant implications for the industry.

**Keywords:** low-altitude economy; straddle monorail; video data; application scenarios; intelligent inspection

收稿日期: 2024-09-03 修回日期: 2024-12-04

作者简介: 吴树强, 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市轨道交通机电设备系统设计、研究工作, treeheni@163.com

基金项目: 中铁工程设计咨询集团有限公司科技开发课题(KY2024XG001); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划课题(2022-重点-17)

引用格式: 吴树强. 无人机视频智能巡检系统在跨座式单轨交通的应用[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 124-132.

WU Shuqiang. Application research of unmanned aerial vehicle video intelligent inspection system in low-altitude straddle monorail transportation[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 124-132.

作为传统空域交通模式基础上的有效补充和延伸,我国首先提出低空经济的概念和内涵,并将其与新质生产力相融合,对人类传统向太空、地面、地下空间生存发展的基本格局做出了重要补充。2023 年中央经济工作会议、2024 年 2 月中央财经委员会、2024 年政府工作报告都指出打造低空经济等新增长引擎的重要性,与传统航空经济不同的是,超低空经济(120 m 以下)的航空权并不需要向主管部门特别审批,这就给低空经济带来了更加广阔和灵活的发展空间<sup>[1-2]</sup>。

随着我国经济改革向着更深层次发展,更具创造性的经济模式和产业生态不断涌现,这就要求我们为新的生产力提供更加广阔的发展空间,在此背景下,低空经济的概念应运而生。近几年,我国低空经济由起步发展阶段快速在各行业迈向升级加速拓展阶段。特别地,当前我国正在安徽、海南、湖南、四川和江西 5 省开展低空经济试点,并出台了“十四五”低空改革规划文件,为低空互联网服务产业发展提供了机遇。

现阶段,针对低空经济在城市轨道交通领域的探讨是非常有限的,部分研究的应用场景聚焦于低空测量技术方面。低空、超低空无人机的使用在城市轨道交通领域的应用研究亟待加强,城市轨道交通领域的低空经济价值更有待深入挖掘。本文聚焦城市轨道交通中的中低运量交通制式的低空经济应用场景和应用模式研究,首次提出一种应用于跨座式单轨交通的基于无人机载具平台的视频智能巡检系统,分析其在跨座式单轨交通中的应用方案和价值,以期在以高架敷设为主的跨座式单轨交通制式探索一种切实可行的低空经济应用场景。

## 1 低空经济的内涵、特征和关键技术

低空经济是以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的各类低空飞行活动为牵引,辐射带动相关领域融合发展的综合性、创新型经济形态,主要包括低空经济涉及的设备设施制造产业、保障服务产业和外延的经济形态或生态产业。低空经济主要活动范围一般包括在垂直高度 1 000 m 以下、根据实际需要延伸至不超过 3 000 m 的空域<sup>[2-3]</sup>。

将低空经济当做一个系统性工程来看,从技术实现手段上,无人机搭载平台、视频摄像设备、低空组网网络及其后台软硬件系统是低空经济的关键技术。

无人机搭载平台主要包含无人机飞控平台软硬件,主要实现的功能包括无人机遥控和信息传输 2 大部分,这就要求系统组网方式要考虑固定站或者移动

站与无人机数量的配合关系。视频摄像设备或视频采集设备可以集成或独立于无人机搭载平台。从生产作业中的检修巡检角度来看,无人机飞行空域管理并不需要进行特殊的航路航线申请,空中交通管控比较灵活,只需要沿线路进行伴飞即可,对其网络化管理在下文将进行详细阐述。针对飞行安全管理问题,应重点关注目标探测不遗漏的“可观测”、感知周边环境有效规避的“可规避”、有效控制防干扰的“可控制”3 个问题,通过现有自组网或者利用 5G 公网方案,可以较好解决这些问题<sup>[4]</sup>。

低空经济是指以低空空域为依托,以通用航空产业为主导的经济活动,主要应用场景包括货运物流、载人出行、文旅活动、生产作业、公共服务、科研教育等行业,载具产品包括无人机、直升机等。深入研究跨座式单轨交通制式低空经济优先级评价要素,本文对文献 1 中的评价体系调整见表 1。

表 1 低空经济应用场景优先级评价

Table 1 Prioritized evaluation of low altitude economy application scenarios

场景	技术成熟程度	需求迫切程度	经济效益程度	风险可控程度
货运物流	★★★★☆	★★★★☆	★★★☆☆	★★★★☆
载人出行	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★	★★☆☆☆
生产作业	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
公共服务	★★★★☆	★★★★★	☆☆☆☆☆	★★★★☆

注:★越多代表技术成熟度、需求迫切度、经济效益性和风险可控越高。

上述评价中主要针对跨座式单轨交通的轨道梁巡检生产作业做出调整,技术成熟度、需求迫切度均有大幅提升,同时无人机实现的低空巡检可以大幅节省运营维保人员的工作量,提高巡检效率和精度,经济效益巨大,因跨座式单轨制式享有独立路权,且高架敷设,该应用场景风险可控程度较高。

## 2 跨座式单轨交通制式基本特点和需求

根据《城市轨道交通分类》(TCAMET 00001-2020),运输能力在 1 万~3 万人次/h 的城市轨道交通系统为中运量系统;小于 1 万人次/h 的为低运量系统<sup>[7]</sup>,两者统称为中低运量轨道交通。

世界范围内现有的中低运量轨道交通制式包括齿轨、有轨电车、悬挂式单轨、APM、跨座式单轨、直线电机系统、中低速磁浮、电子导向胶轮系统和导轨式胶轮系统(以高架为主,拥有独立路权),截至

2022年底,世界中低运量轨道交通运行线路总长度为18 744.84 km<sup>[8]</sup>。

本文聚焦低空经济在中低运量轨道交通中的应用,重点探讨以高架敷设体系为主的跨座式单轨交通制式。当前城市轨道交通建设正从以地铁建设为主逐步向多元化制式协调发展的方向转变,包括地铁、轻轨、跨座式单轨、悬挂式单轨、中低速磁浮、有轨电车、市域快轨等<sup>[9]</sup>。跨座式单轨交通作为中运量轨道交通系统,是城市轨道交通的重要组成部分,可为城市现代化的轨道交通建设提供多样化选择。

不管是在需求侧还是供给侧,跨座式单轨具有建设成本低、建设周期短、环保性能优、适应能力强、景观效果好等优势,受到越来越多城市的关注,我国单轨产业链较为完整和成熟。21世纪初,重庆市为解决城市山地地形复杂带来的线路坡度大问题,首次引进跨座式单轨系统,建成了重庆轨道交通2号线。截至2022年底,世界上共有10个国家22座城市的26条跨座式单轨线路运营,总里程达413.0 km。虽然单轨交通运营里程占比较小,但近年来发展迅猛,规划里程大幅提升。截至2024年,全国跨座式单轨开展线网规划的城市已超过50个。截至2024年6月,全国跨座式单轨市场统计中,已开通运营的城市2座(重庆市、芜湖市),运营里程分别为98.5和46.3 km;线网规划已批复(正开展建设规划)的有潍坊、遵义、邯郸等18座城市,线网规划总里程2 842 km。开通运营的旅游单轨交通1条,为银川花博园旅游线,运营里程5.67 km。

除了在城市通勤线路方面的应用优势和广阔前景外,因为其建设成本低、建设周期短、环保性能优、适应能力强、景观效果好等独特优势,跨座式单轨制式在旅游轨道交通市场也有着巨大的发展潜力。随着生活水平的提高,人们对旅游休闲需求不断增加。2017年交通运输部、文化和旅游部等6部门联合印发的《关于促进交通运输与旅游融合发展的若干意见》提出,完善旅游交通的基础设施网络、强化客运枢纽的旅游服务功能、加强服务景区客流的公共交通组织、开发适合旅游特点的特种观光列车等措施。各地对旅游轨道交通需求旺盛,通过构建“快进慢游”的旅游交通网络,游客可乘坐轨道交通往返景区,不仅可以提高旅游品质、丰富旅游体验,同时可以带动旅游资源整体开发和联动发展,促进地方经济发展<sup>[10-11]</sup>。

跨座式单轨的制式以高架敷设为主,其轨道梁、指

型板、支座等轨道梁部件,及疏散通道、电缆通道等的高空检修作业难。对轨道线路的检修需要在停运的天窗期进行,时间短、任务重、高空作业风险高等都是亟待解决的问题,需要一种不受线路运营影响、避免高空作业、快速精准检修的技术解决上述问题。

### 3 低空+跨座式单轨交通解决方案研究

跨座式单轨旅游线路敷设于旅游景区内,或者城市主要交通枢纽(如高铁站、机场)与景区的联络通道,以黄山市旅游T1线工程为例,其线路连接黄山北站高铁站与黄山风景区,中间还衔接了其他的风景名胜区,穿越山地地形较多,存在较多陡坡挂线,轨道梁与地面距离高达70~80 m,对线路的日常检修维护提出了更加严格的要求,低空无人机技术的应用就显得更加迫切、优势凸显。

基于此,本文提出一种应用于跨座式单轨交通的超低空无人机智能巡检运维系统,用于解决跨座式单轨交通高架体系巡检检修问题,同时进一步开拓跨座式单轨交通低空经济领域价值,提升建设工程的智能化、智慧化<sup>[12-14]</sup>。

#### 3.1 系统架构

本文提出的适用于跨座式单轨交通制式的超低空无人机智能巡检运维系统由无人机载具(含机载摄像头等设备)<sup>[15-16]</sup>、低空智联网、车站级系统、中心级系统构成。

搭载高清摄像头采集视频数据的无人机载具无巡检任务时停留在车站的无人机平台上,进行动态充电、数据上传。巡检任务下达后,无人机从车站起飞,沿预先规划的线路在车站之间的轨道梁外侧飞行,主要检查轨道梁病害情况,包括纵向形变、是否开裂、指型板侧面螺栓是否紧固等。无人机飞至下一站或某站(视无人机巡航电量确定单次巡检任务飞行距离)无人机平台进行动态充电、数据上传。在该站完成充电及数据上传后起飞,向该无人机驻点车站飞行,该次回飞巡检变为巡检轨道梁、疏散平台上部,即跨座式单轨列车走行面。无人机可通过轨道梁坐标生成无人机飞行巡护航线并上传至车站级、中心级平台,可远程接收作业指令,远程自动起飞,自动执行线路巡检航线,飞行过程中可在线上实时直播巡查。飞行器自动降落后,将拍摄照片视频导出进行进一步分析识别。无人机巡检飞行路径如图1所示,无人机巡检侧部与上部飞行示意如图2所示。

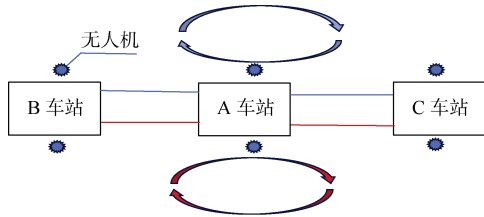


图1 无人机巡检飞行路径

Figure 1 UAV inspection flight path diagram

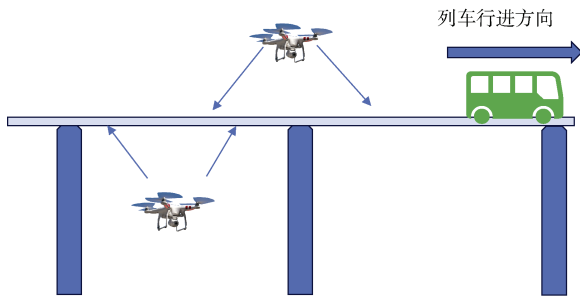


图2 无人机巡检侧部与上部飞行路径

Figure 2 UAV inspection of side and upper flight path diagram

上述无人机巡检中要注意的问题是巡检无人机应跟踪在同向行驶的列车后部安全距离飞行，距离巡检工作面 500~1 000 mm，保持与列车纵向 5~10 m 的安全距离，并由无人机载具实现主动避障功能。因为城市轨道交通行车组织的问题，在早晚高峰时间内发车间隔减小、发车密度增大，此时后续列车存在赶上前序巡检无人机而使无人机巡检距离缩小的问题。同样地，应要求无人机载具备较灵敏的主动避障功能，侧向巡检和顶部巡检无人机分别采取侧向远离、顶升远离的避障策略，确保巡检任务不影响行车安全。适用于跨座式单轨交通制式的超低空无人机智能巡检运维系统整体的系统构成如图 3 所示。

### 3.2 无人机载具

可用于低空飞行作业的无人机载具是低空经济的基石之一，也是本文研究适用于跨座式单轨交通制式超低空无人机智能巡检系统方案的基础之一。

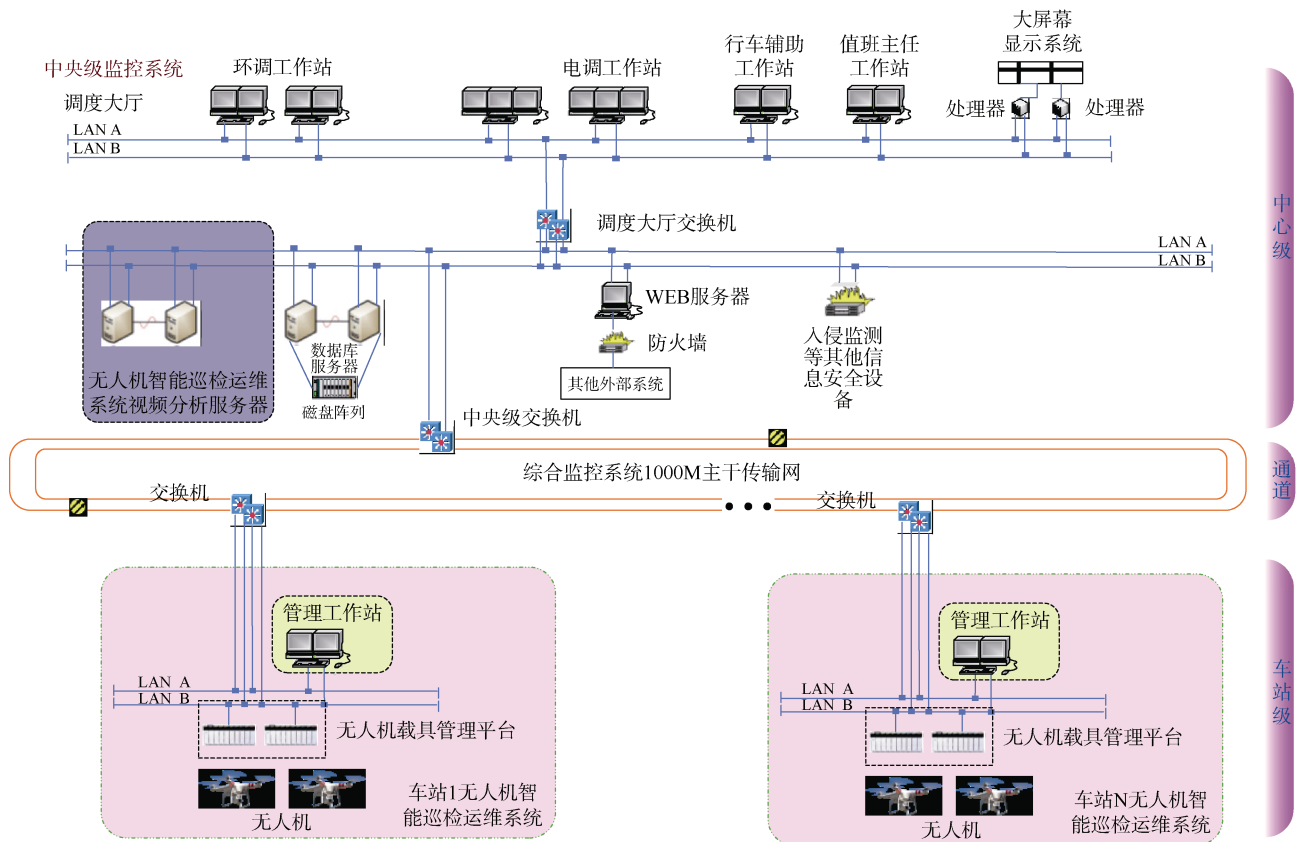


图3 超低空无人机智能巡检运维系统构成

Figure 3 Composition diagram of the intelligent inspection and operation system for ultra-low altitude unmanned aerial vehicles

国内低空飞行活动概述如表 2 所示，低空飞行器分为传统直升机、电动垂直起降航空器(electric vertical take-off and landing, eVTOL)、无人机和热气球等多种

形式。从本文提出的技术方案的应用场景分析，本方案首选轻微小型无人机作为无人机载具，实现低空轨道梁巡检检修任务。

表 2 国内低空飞行活动概述

Table 2 Overview of domestic low altitude flight activities

低空空域	飞行器类型	低空飞行活动	市场成熟度
300 ~ 1 000 m	直升机、eVTOL (载人)	应急救援、特色文旅；城市空中巴士(机场接驳、城市跨区商务、城际商务)	通航机场少、飞机少、直升机价格高；eVTOL 在 50 ~ 400 km 的中短途出行来看，更具有便捷性。全球尚在研发过程，规模化运营后成本会大大降低
120 ~ 300 m	中大型无人机	快递物流，同城即时送(2~4 h 达)；跨城跨海急送服务(4~6 h 达)	示范航线，仍需补贴，尚未实现商业化运营盈利
120 m 以下	微轻小型无人机	即时终端物流配送(3 km, 15 min)；城市管理(高速巡检、轨道作业巡检、巡逻、测绘)	应用广泛，末端即时配送商业模式成熟

我国是世界上无人机载具生产大国、强国。考察国内商用无人机的市场应用情况，如大疆、道通智能、零度智控、华科尔等都有市场应用成熟、技术先进、质优价廉的无人机载具产品，可用于采集高清晰度的视频数据，并已经实现了农业、工业等很多场景的商业化应用。某品牌型号的工业巡检用无人机主要参数见表 3。

表 3 某品牌型号的工业巡检用无人机主要参数  
Table 3 Main parameters of a specific industrial inspection drone model

项目	参数	项目	参数
整机质量	105 kg(不含飞行器)	RTK 基站定位精度	水平：1 cm+1 ppm (RMS) 垂直：2 cm+1 ppm (RMS)
工作环境温度	-35 至 50℃	最大作业半径	7 000 m
防护等级	IP55	充电时间	25 min
最大允许降落风速	12 m/s	机载监控相机	分辨率：920×1 080 视角范围：(FOV) 180°

目前国内主流厂商的无人机产品基本可以实现全天候 24 h 巡检作业，按照单次巡航巡检 6 km 计算(考虑一部分无人机机载电池余量)，以芜湖市轨道交通 1 号线工程为例(线路全长 30.46 km，均为高架敷设线路，共设 25 座车站，均为高架站)，可以将线路划分为 5 个无人机巡检区间，具体划分如图 4 所示。

按照跨座式单轨的特点，城市轨道交通主干线路常采用敷设于道路中间绿化带的方式，巡检区间的划

分还应考虑主干道路绿化树木的影响。

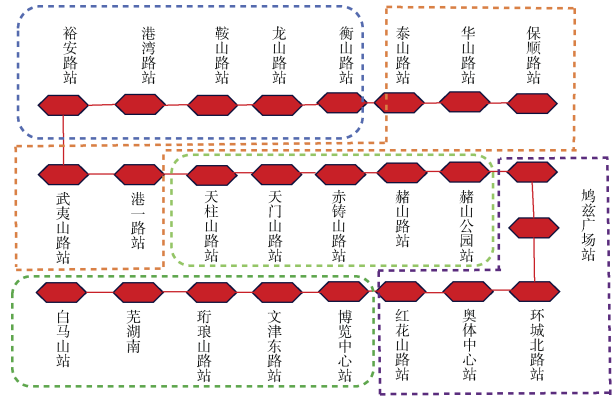


图 4 巡检区间划分示意

Figure 4 Schematic diagram of inspection interval division

在经济效益方面，目前跨座式单轨工程主要采用检修工程车的方式实现对轨道梁桥的日常巡检和检修，传统的人工检测效率低，作业人员劳动强度大，影响轨道梁的及时养护。检修车的价格一般每辆 800 万元左右，如果考虑检修车自动防护系统，则价格还会更高，每条线路按配置 3 台巡检车考虑，巡检车投资共约 2 400 万元，其实现的基本功能是对轨道梁桥、指型板等的故障检测。本文提出的无人机智能巡检方案中，无人机采购的投资占系统方案全部投资的绝大部分，按目前市场价格 1 台工业化无人机价格约 5 万元，以芜湖市轨道交通 1 号线工程为例，线路划分为 5 个无人机巡检区间，每个巡检区间配置 2 台无人机，全线共需配置无人机 10 台，投资约 50 万元。车站级、中心级硬件系统如果按照与其他系统共用或者云平台的方案，无人机智能巡检系统的投资只有传统巡检车方案的 1/50，性价比是极高的，这也反映了低空经济的巨大优势和应用潜力<sup>[11-14]</sup>。

### 3.3 低空智联网建设

低空智联网<sup>[2]</sup>是实现无人机飞行精准控制、数据传输等的核心，是跨座式单轨无人机智能巡检检测系统成功的重要关键技术。在商业化工业、农业用无人机领域，无人机飞行控制、数据传输等都是采用自带天线+无人机控制手柄的方式。无人机自带飞控程序，实现智能避障、姿态稳定等功能，同时实现了与手持终端的实时数据传输。无人机应用于跨座式单轨交通线路巡检时，可供使用的低空智联网方案还有 5G 公网、线路综合承载的 LTE 技术等，低空智联网建设方案对比如表 4 所示。

表 4 低空智联建设方案对比  
Table 4 Comparison of low altitude intelligent networking construction Plans

联网方案	工作频段	是否配套天线	网络稳定性	对轨道交通网络影响	备注
无人机天线	GPS: L1 C/A, L2 BeiDou2: B1I, B2I, B3I BeiDou3: B1I, B3I GLONASS: L1, L2 Galileo: E1, E5B	否	高	无	
5G	Sub6GHz, n1/n3/n28/n41 n77/n78/n79	有可能增设天线或基站	高	无	特别是对于跨越山岭的旅游线路
LTE	450~470 MHz 698~862 MHz 1 710~2 200 MHz 2 300~2 400 MHz 2 500~2 690 MHz	使用轨道交通LTE已有天线	高	较高	挤占带宽

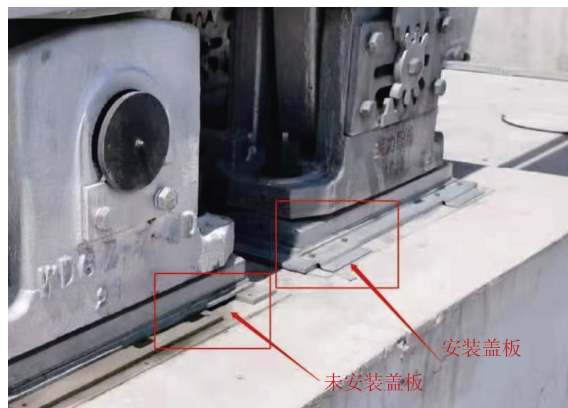
以正在建设的黄山市旅游轨道交通 T1 线为例，线路全长约 43.71 km，其中有大段线路跨越山岭后到达景区，在跨越山岭路段既有 5G 商用网络的覆盖是不够理想的，如无人机智能巡检系统利用 5G 网络建设低空智联网，还需要在网络优化上补强一些基站或天线，需要增加部分投资。LTE 技术虽然可以利用沿轨道交通线路布置的天线加入网络，但是城市轨道交通 LTE 综合承载的是线路运营所需的信号系统、视频监控等信息传输任务，其向无线电管理委员会申请的带宽也有限，城市轨道交通自身应用都显拮据，如再叠加承载无人机智能巡检系统业务，必将对城市轨道交通线路安全运营造成影响，存在安全隐患。综上所述，无人机智能巡检系统完全可以利用无人机载具自身天线、控制端等设备组成低空智联网，目前在相关行业已经取得成熟的应用经验，既不增加额外投资，也不会对运行的跨座式单轨线路造成运营安全影响。

### 3.4 视频智能分析

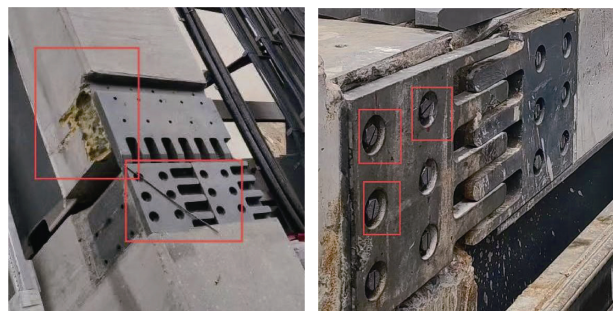
视频智能分析技术在城市轨道交通领域的应用是非常成熟的，如大华、海康、旷视、商汤等企业都具有商业化应用产品和成熟的视频分析算法。目前视频智能分析技术在城市轨道交通的应用主要是在 CCTV 视频监控、安检智能判图方面，在部分项目中还应用在供电专业的变电所智能巡检等智慧化领域，已经取得很好的应用效果<sup>[15]</sup>。

在跨座式单轨轨道梁桥的线路无人机自动巡检方面，搭载在无人机上的视频摄像机主要是实现轨道梁

桥、墩柱、指型板、支座、疏散平台、检修平台等设施形变、螺栓松动、是否开裂等视频数据信息采集。通过视频分析算法抓取的图 5 所示设施故障或异常信息画面，主动推送给运维人员，指导维修人员有针对性处置，大幅降低运维人员日常检修的工作量，在很大程度上避免了人为检修的疏漏。



(a) 支座盖板未安装画面



(b) 指型板缺陷及异物画面

(c) 指型板紧固螺栓异位画面

图 5 无人机巡检视频智能分析提示画面

Figure 5 Intelligent analysis prompt picture for drone inspection video

### 3.5 算法应用

现有针对桥梁检测的方法以人工目视检查、人工借助望远镜观察和人工借助桥检车等设备观察为主。随着近年来无人机、机器人和机器视觉技术的快速发展，一些新兴的检测技术开始被应用于桥梁检测中，例如基于无人机的桥梁检测技术、基于爬壁机器人的检测技术和基于智能桥检车的桥梁病害检测技术<sup>[16-17]</sup>。桥梁的病害检测包括结构的表面病害和内部信息的测量。桥梁检测中的关键检测项目见表 5。

本文提出的针对跨座式单轨轨道梁桥的无人机视频智能分析系统是一种近年来被广泛研究的方法，即基于视觉的非接触测量方法，这种方法相较于基于全站仪等测绘仪器的测量方法具有成本低、系统简单、

测量速度快等优势。

表5 轨道梁桥检测类别和项目

Table 5 Categories and items for track beam bridge inspection

类别	项目
桥梁病害	裂缝、剥落/破损、锈蚀、螺栓松动和涂层破坏
桥梁变形	梁体变形、缆索系统变形和建设过程中桥梁大型构件的吊装过程变形
桥梁三维形态	桥梁局部和整体三维模型快速重建

但基于无人机动态飞行平台的视觉测量方法存在无人机本身基点运动导致测量基点不稳定的通病，为了解决无人机非接触测量存在的基点运动问题，本文提出2种解决方法，一是调整无人机运动扫描方式，二是强化视频分析算法的训练。

首先，调整无人机运动扫描方式主要思路是改变传统无人机飞行扫描抓取图像，将在巡检全线路轨道梁桥飞行中定点摄取的超高清图片用于建立轨道梁桥及其附属设施的基础图像模型，并将所有桥梁构件上的病害进行标记，后续在日常无人机飞行巡检中以正常飞行速度巡检提高巡检效率，抓取潜在病害点主动推送给运维人员进行人工确认，以半月至一月为周期进行强化训练，建立针对线路轨道梁桥的成熟的巡检模型。

在视频分析算法的训练方面，首要问题是视频分析算法的选择。不同于传统视频监控系统中对于行为识别、事件检测等目标检测、目标跟踪等算法<sup>[18]</sup>，跨座式单轨轨道梁桥病害的发生机理和特点具有发展缓慢甚至极缓慢、静态发育等特征，这就要求应用于视频分析的算法具备图像处理速度快、精度高的能力。近年来卷积神经网络被广泛应用于结构健康检测领域(裂缝监测)，应用较多的模型有R-CNN、FasterR-CNN及基于区域的全卷积网络(R-FCN)等<sup>[19-21]</sup>。结合跨座式单轨线路运营情况，建议模型训练摄取轨道梁桥图像的时间避开早晚高峰的时段，以9:30—16:30、19:30—次日6:00为宜，主要考虑跨座式单轨线路一般敷设于城市主干道路的中间绿化带上，图像摄取时尽量减小无人机飞行对早晚高峰时道路车辆影响的潜在可能。在中心级用于无人机智能巡检视频分析的主备服务器要求配置高质量的GPU芯片，初期模型训练的图像摄取数量暂按8:2的比例取2000张训练图像和500张测试图像，在模型训练过程中以不低于每周3次的频率辅以人工测量以修正模型训练的参数<sup>[17]</sup>。

### 3.6 系统功能

为实现低空无人机线路智能巡检系统的技术目标，系统具备的主要功能如图6所示。

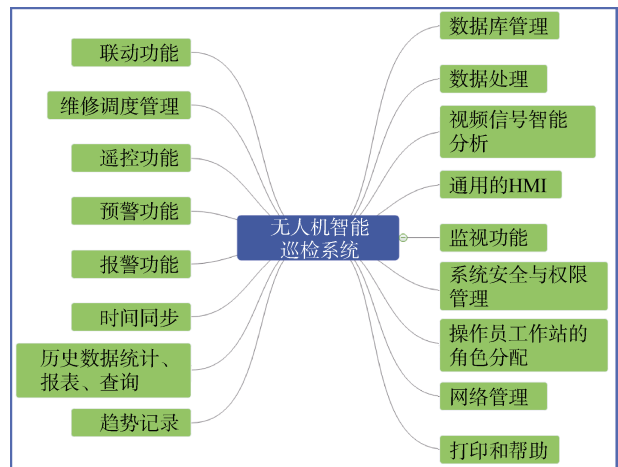


图6 低空无人机线路智能巡检系统功能架构

Figure 6 Functional architecture diagram of low-altitude unmanned aerial vehicle intelligent power line inspection system

针对系统功能，如数据库管理、通用的HMI人机界面、设备监视、历史数据统计、网络管理等通用功能，结合系统架构设计情况统一纳入集成的上位系统，技术上是完全可行的。针对一些关键点功能，比如联动功能的实现、中心级或者线路级维修调度员工作站的实现，需要结合线路运营管理分工等进行详细设计。本文基于城市轨道交通工程的基本情况，针对上述关键点功能提出一点建议。

首先，针对实现系统联动功能，考虑对轨道梁梁体异常(如形变、裂纹、指型板异位、螺栓异位等)、异物侵入、列车运行前方障碍物报警等，本系统将此信息通过与信号系统建立数据接口的形式发送给维修调度，再由维修调度通知给行车调度员(或直接发送给行车调度员)进行处置。针对无人机智能巡检系统发现的线路火情，本系统将此信息通过与火灾自动报警系统建立数据接口的形式发送给防灾调度进行处置。

其次，针对线路中心级定位如何管理本系统功能的调度员设置问题，考虑到目前国内包含跨座式单轨在内的城市轨道交通工程控制中心虽然设置了行调、环调、电调、维调、值班主任等岗位，但日常实际值班的一般为两位调度员，可以考虑本系统功能由设置于车辆段或者控制中心的维调管理，巡检过程中发现一般异常时由维调下发维修调度通知单进行处置，巡检发现可能影响行车安全的异常时由维调通知行调或

值班主任进行应急处置。

## 4 结束语

低空经济是培育和发展新质生产力的重要领域,在城市轨道交通领域内,传统地铁制式因其绝大部分敷设在地下隧道内,低空经济的可扩展性还有待进一步研究,但是以高架体系敷设为主的跨座式单轨制式的低空经济发展前景广阔,凸显了以跨座式单轨为代表的中低运量轨道交通制式的优点。

跨座式单轨制式在巡线检修的自动化和智能化方面要进一步做无人机低空经济模式的社会经济效益分析,如人工成本核算、无人机自动化巡检等的风险分析,以进一步提高可靠性和安全性。

本文提出的基于超低空商用化无人机飞行载具的智能巡检系统可以用于指导系统设计、运营维修、相关系统软硬件研发和应用,对实现跨座式单轨制式轨道梁桥自动化巡检、降低运营人工巡检工作量和减少人工漏检等方面具有重要的指导意义。

### 参考文献

- [1] 任晓栋, 张玉. 低空经济领域城市交通运输的发展思考[J]. 中国市政工程, 2024(4): 1-6.  
REN Xiaodong, ZHANG Yu. Thoughts on the development of urban transportation in the field of low altitude economy[J]. China municipal engineering, 2024(4): 1-6.
- [2] 范恒山: 把发展低空经济作为构建新发展格局的重要抓手[EB/OL]. (2022-02-21)[2024-05-30] [https://share.gmw.cn/economy/2022-02/21/content\\_35533899.htm](https://share.gmw.cn/economy/2022-02/21/content_35533899.htm).
- [3] 樊一江, 李卫波. 我国低空经济阶段特征及应用场景研究[J]. 中国物价, 2024(4): 98-103.  
FAN Yijiang, LI Weibo. The development stage and application scenarios of China's low-altitude economy[J]. China price journal, 2024(4): 98-103.
- [4] 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空互联网与无人机产业应用[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1441-1450.  
FAN Bangkui, LI Yun, ZHANG Ruiyu. Initial analysis of low-altitude internet of intelligences(II) and the applications of unmanned aerial vehicle industry[J]. Progress in geography, 2021, 40(9): 1441-1450.
- [5] 刘先江, 宋丹, 徐政. 以低空经济发力打造新质生产力发展新引擎[J/OL]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024: 1-12. (2024-07-15)[2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BHDS20240710001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [6] 沈映春. 低空经济的内涵、特征和运行模式[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2025, 46(1): 108-117.  
SHEN Yingchun. Low-altitude economy: definition, characteristics and operation modes[J]. Journal of Xinjiang normal university (philosophy and social sciences), 2025, 46(1): 108-117.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通分类: GB/T 44413—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of urban rail transit: GB/T 44413—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [8] 贺鹏, 刘鹏辉, 李松松, 等. 世界中低运量轨道交通制式发展及适用性分析[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(3): 11-22.  
HE Peng, LIU Penghui, LI Songsong, et al. Development and applicability analysis of medium-and low-volume rail transit systems worldwide[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(3): 11-22.
- [9] 李雪松, 晁宇宏, 徐闯闯, 等. 我国中低运量城市轨道交通发展现状分析及相关对策建议[J]. 现代城市轨道交通, 2024(7): 1-7.  
LI Xuesong, CHAO Yuhong, XU Chuangchuang, et al. Analysis of current development status and suggestions for countermeasures for medium and low traffic volume urban rail transit in China[J]. Modern urban transit, 2024(7): 1-7.
- [10] 刘俊, 武农, 孙晓彤. 跨座式单轨交通发展浅析[J]. 铁道勘察, 2021, 47(5): 25-29.  
LIU Jun, WU Nong, SUN Xiaotong. Development of straddle type monorail transit[J]. Railway investigation and surveying, 2021, 47(5): 25-29.
- [11] 王晶, 田腾飞. 中低运量城市轨道交通建设的困境与对策[J]. 人民公交, 2024(6): 37-39.

- WANG Jing, TIAN Tengfei. Predicament and countermeasures of urban rail transit construction with medium and low volume[J]. People's public transportation, 2024(6): 37-39.
- [13] 施仲衡, 丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 1-4.
- SHI Zhongheng, DING Shukui. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 1-4.
- [14] 交通运输部科学研究院. 交通运输碳达峰、碳中和知识解读[M]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- Scientific Research Institute of the Ministry of Transport. Interpretation of peak carbon dioxide emissions and Carbon Neutralization in Transportation[M]. Beijing: China Communications Press, 2021.
- [15] 冯增文, 李珂, 李梓豪, 等. 低空无人机的倾斜摄影测量技术在城市轨道交通建设中的应用[J]. 测绘通报, 2020(9): 42-45.
- FENG Zengwen, LI Ke, LI Zihao, et al. The application of oblique photography technology based on low-altitude UAV in urban rail transit construction[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2020(9): 42-45.
- [16] 许飞雪, 刘勤明, 叶春明, 等. 基于服务性能合同模式下单部件系统视情维修策略研究[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(2): 460-464.
- XU Feixue, LIU Qinming, YE Chunming, et al. Research on condition-based maintenance for single-unit systems under performance-based contracting[J]. Application research of computers, 2021, 38(2): 460-464.
- [17] 蒋赏. 基于计算机视觉的桥梁智能检测方法 with 装备研发[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- JIANG Shang. Research and development of bridge intelligent detection method and equipment based on computer vision[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [18] 陈光, 乔梁, 何赵亮, 等. 基于目标检测的视频分析方法研究[C]//2023年江西省电机工程学会年会论文集. 南昌, 2024: 223-226.
- [19] HUANG J, RATHOD V, SUN Chen, et al. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2017: 3296-3297.
- [20] LIU Wei, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot MultiBox detector[C]//Computer Vision—ECCV 2016. Cham: Springer International Publishing, 2016: 21-37.
- [21] XIE Xuemei, CAO Guimei, YANG Wenzhe, et al. Feature-fused SSD: fast detection for small objects[C]//Ninth International Conference on Graphic and Image Processing, 2017: 10615.

(编辑: 王艳菊)

(上接第110页)

- [5] 周琦, 朱铝芬, 韩雪, 等. 基于云计算的轨道交通设备运维管理系统的研究与设计[J]. 交通世界, 2018(S2): 259-261.
- ZHOU Xun, ZHU Lyufen, HAN Xue, et al. Research and design of rail transit equipment operation and maintenance management system based on cloud computing[J]. TranspoWorld, 2018(S2): 259-261.
- [6] 林勇, 徐钦伟, 谭冠岗, 等. 基于大数据的轨道交通供电设备运维管理系统的设计与实现[J]. 新型工业化, 2018, 8(3): 9-16.
- LIN Yong, XU Qinwei, TAN Guangang, et al. The designing and practicing of the management system of rail transit power system based on big data[J]. The journal of new industrialization, 2018, 8(3): 9-16.
- [7] 东升. 城市轨道交通供电智能运维系统应用研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(5): 61-65.
- DONG Sheng. Study on application of intelligent operation and maintenance system for power supply system of urban rail transit[J]. Electric railway, 2023, 34(5): 61-65.
- [8] 蒋先国, 陈兴强. 智能牵引供电系统现状与发展[J]. 中国铁路, 2019(9): 14-21.
- JIANG Xianguo, CHEN Xingqiang. Current situation and development of intelligent traction power supply system[J]. China railway, 2019(9): 14-21.

(编辑: 王艳菊)