

基于物联网的高速公路隧道巡检机器人系统应用与研究

吴桐 李丹雄 张艺莹

广东省路桥建设发展有限公司广贺分公司 广东 肇庆 526400

摘要：高速公路隧道中交通事故频发，现有的传统摄像机视频检测手段存在局限性和视野盲区。为应对未来高速公路隧道里程的快速增长，需要进一步强化隧道的日常巡检。本文结合物联网、机器人技术和局域网通信技术，以广贺高速马头塘隧道为试点，探讨了智能巡检机器人系统的应用和研究。系统利用多传感器感知和数据交互技术，实现了隧道环境和路况信息的实时采集，具备检测和告警多种异常交通事件的功能。试点运行结果表明，该系统能够精准识别隧道内的异常交通事件，实现实时智能巡检和隧道内部态势的全面管控，显著降低了巡检成本，提高了工作效率。未来，智能巡检机器人系统有望在更多高速公路隧道中应用，为保障隧道安全运行发挥更大作用。

关键词：高速公路隧道；巡检机器人；数据分析；全天候巡检；异常事件视频检测

1 前言

截至2022年底，我国公路隧道数量已达24850处，总长26784.3公里，年增长速度位居世界首位。随着隧道里程的不断增加，隧道交通安全问题愈发突出。十四五期间，国家将加速推进现代化综合交通体系建设，强调从速度和规模向质量和效益的转变。智慧交通的发展以云计算、大数据、物联网、5G、移动网络、AI智能、激光雷达等技术创新为根基，助力“交通强国”战略全面落地。

为了提升隧道事故预防能力、事件监测准确率及巡检数据客观性和稳定性，需要利用图像识别、红外热成像、数据分析、快速精准定位、无线网络与加密等技术，建立隧道智能巡检机器人系统。该系统在重要路段如长隧道、隧道群等区域实现7*24小时全天候智能巡检，对隧道环境、交通情况、异常事件进行不间断监控，并通过数据分析及时预警报警，提升管理效率和水平。

2 系统需求分析

本文针对公路日常运维与巡检的需求，探讨了一种能够对隧道内部情况进行实时自动化监测、记录与报警的系统。

该系统具备实时同步记录和传输隧道内部情况的功能，能够在出现火灾、行人入侵、路面抛洒物等紧急事件时，准确标记出相关危险交通事件发生的位置。这不仅提高了应急处置的效率，还为相关人员提供了更加准确的信息，从而有效节省了人力和物力资源。

该系统的应用对于保障公路隧道的安全运行具有重要的实际意义。为了助力人工隧道巡检更加方便快捷地对高速公路隧道内部的交通运行状态、危险事件进行实时监测记录与及时报警，本系统基本要求如下：

- 隧道设施、路况巡检；

- 隧道异常事件检测；
- 隧道温湿度、空气指数数据收集和分析；
- 隧道病害检测；
- 隧道内重大事故应急处置、逃生指挥；
- 机器人适用弯曲半径不小于高速公路隧道道路极限设计半径的弯曲导轨；
- 机械结构需要简单可靠利于后期技术员的维护；
- 能及时自行开启充电。

3 总体方案

隧道智能机器人巡检系统是一个专门针对隧道环境设计的综合巡检系统。它以智能机器人为核心，结合了多种声光像采集设备、辅助检测组件和自动化机电设备。该系统能在无人或少人值守的情况下，对隧道进行全方位的监测和诊断。通过先进的智能诊断技术，该系统能实现对隧道内环境、电缆和设备的隐患预警及后期状态评估。与传统的巡检方式相比，隧道智能机器人巡检系统不仅提高了巡检的效率和准确性，还降低了人工成本和潜在的安全风险。

3.1 系统架构

隧道智能巡检机器人系统是基于一个综合数据管理平台的系统，其结构由轨道总成、供电系统、通信系统以及机器人本体组成。机器人本体进一步细分为动力组件、检测组件、定位组件、电源及通讯组件等部分，确保了其功能的多样性和完整性。该系统的架构为网络分布式，包括基站层、通讯层和终端层三个层次。

3.2 机器人本体结构

机器人本体的结构主要包括金属外壳、电池舱以及多个设备舱。核心部分是内置的高性能电机，它与高效的传动系统共同组成了驱动装置模块，确保了机器人的

高效运作和高功率输出。机器人内部还搭载了各类智能传感模块，负责完成特定的事件预警和日常巡检任务，使得机器人具备高度的智能化和自主性。

隧道巡检机器人通常在隧道入口10米处待机。在突发事件发生时，它们能够迅速响应，完成预警或应急疏散等关键任务。其内置的高性能电机，提供驱动动力，确保了快速的移动速度。隧道巡检机器人集成了五大智能模块，这些模块协同工作，使机器人能够高效地完成各种应急处置任务。

3.3 机器人导轨结构

固定航空铝合金导轨为机器人的精确移动提供了稳定的基础，5.8G无线网桥确保了数据传输的稳定性和高效性。爆闪灯和喇叭在特定情境中发挥告警指挥作用，为隧道内的安全通行和应急指挥提供全面保障。

4 系统功能的实现

4.1 隧道内温湿度及有毒有害气体检测功能

隧道中的有害气体一直被视为重要的危险源，一旦监控处理疏忽，极易引发安全事故。该机器人搭载了八合一温湿度及有毒有害气体检测模块，能够实时监测隧道内的温湿度及其他有毒有害气体。当检测到有毒有害气体浓度超过预设的报警阈值时，后台系统会立即触发报警，并迅速通知监控中心的人员进行确认。

4.2 异常事件视频检测功能

通过高清摄像机与色块检测分析模组，系统可以精准检测车辆违停、拥堵、行人入侵及路面异物等情况。当系统检测到异常事件时，会立即对事件现场进行拍照留存，并实时上传至系统管理平台，为监控人员提供实时信息。

4.3 多视角、全方位视频监控功能

巡检机器人搭载双光谱摄像机，云台可实现水平视角360°，垂直-90°~+90°连续旋转。在固定轨道上长距离移动，能够覆盖整个移动监控范围，对目标多个方位多个视角进行监控，提高监控有效性。

4.4 声光语音预警、指挥功能

机器人内置的声光语音预警系统具备多种功能，不仅可以播放预先存储的语音信息，还可以实时对讲。当隧道出现紧急情况或突发事故时，巡检机器人可通过高分贝声光语音系统进行远程指挥疏导。

4.5 高精度定位功能

利用高精度编码器和RFID标签，机器人能够实现实时追踪在隧道内的位置，支持指定位置的定点移动，通过预设指令或远程操控，机器人能自动运行至目标位置。

4.6 通信传输

无线通信功能模块是实现精确隧道内部状态监测的核心。5.8G无线网桥最大速率可达150Mbps，为远距离无线监控节点提供语音、视频、数据等业务数据的传输。无线网桥构建的通信模块通过无线网桥的站端-桥端，实时传输设备的各种数据信号和控制信号，并可实时上传至云端服务器。

4.7 超温告警及渗水点检测功能

机器人搭载的热成像模块，可以自动检测隧道内物体及环境的温度，支持对不同敏感目标设定不同的温度超温报警阈值。发现温度异常时，系统会自动拍照取证并标记当前位置，触发超温报警并通知监控人员确认。

5 系统应用及效果分析

系统采用软件平台进行数据呈现，前端数据传回后，平台自动生成巡检数据日志，利用人工智能技术进行分析和处理。系统云端服务器配备数据库，存储所有设备运行状态数据和隧道检测数据，并根据客户需求进行深入分析，生成定期隧道检测数据报表。

5.1 WEB端功能

用户通过WEB端进行注册，系统提供权限管理功能，确保数据安全性和隐私性。设备在线管理功能让用户实时监控机器人的状态，自由设定巡检机器人运行速度，选择播放预存提示音，实时监控机器人运行状态。

5.2 实际应用及数据分析

研究成果依托广贺高速马头塘隧道进行实际应用，在广贺高速马头塘隧道内部署智能监测设备，进行路面异物检测、火灾识别及行人入侵等模拟试验。表一展示了机器人系统检测到的报警事件，系统成功检测到异常并正常报警的准确率为95%，误报率为2.63%。

6 下一阶段优化目标

6.1 技术创新与研发

机器人感知技术的准确性和可靠性对机器人系统的性能至关重要。下一阶段将持续研究视觉传感器、激光雷达、红外传感器等多种传感器技术和巡检机器人的结合，提高机器人对机舱设备状态和周围环境的感知能力，更及时获取设备的位置、姿态、温度、震动等信息。

巡检机器人的检修是实现隧道自动化的一个关键问题。机器人在机舱内进行检修操作时，路径规划是一个关键问题。为了实现高效、安全的检修路径，需要研究和开发适用于机舱环境的路径规划算法。这些算法需要考虑机舱内部的拓扑结构、设备的空间分布以及机器人的运动能力等因素。通过优化路径规划算法，机器人可以避开障碍物，并找到最优路径，以实现高效的检修操作。

下一阶段将通过采用人工智能、机器学习和深度学习

习等技术,使机器人能够根据实时感知数据做出自主决策,并进行自主学习和优化。这将提高机器人在复杂机舱环境中的适应能力和应变能力。在技术创新与研发的过程中,安全性和可靠性是非常重要的考虑因素。研究和开发技术要注重安全性,以确保机器人在检修过程中的操作安全,并与其他道路用户和设备保持良好的交互。同时,可靠性是机器人系统的基础,需要通过充分的测试和验证,确保系统在各种工作条件下的稳定性和可靠性。

6.2 安全防护与数据隐私保护

隧道巡检机器人系统涉及到高速公路的关键设施,因此,应进一步确保系统的安全防护和数据隐私保护,保障隧道巡检机器人系统的安全和数据隐私。

下一阶段,在系统开发和运行中,需要采用安全可靠的通信协议和加密技术,以防止隧道巡检机器人系统受到非法入侵或恶意攻击。例如,可以采用Diffie-Hellman协议构建安全通信机制,以确保通信的安全和保密性。同时,也可以采用数字签名和哈希算法等技术,对机器人系统中的数据进行身份认证和加密保护,实现数据的完整性和保密性。除了安全保护,隧道巡检机器人系统还需要制定有效的数据隐私保护措施。隧道巡检机器人系统中包含了大量的机舱状态和设备信息,可以采用数据脱敏和数据加密技术,对机舱内部的敏感数据进行脱敏处理和加密保护,确保敏感信息不被泄露或滥用。另外,为了避免数据被未经授权的人员访问,需要采取访问控制和权限管理等措施,限制对数据的访问。针对机器人系统中可能发生的安全隐患和数据泄露事件,建立完善的安全审计和监控系统,对机器人系统进行实时监测和事件响应,以及对系统进行日志记录和安全审计。这可以帮助检测和预防安全威胁,及时发现异常行为并采取相应措施。提高机器人系统的使用者和管理者的安全意识非常重要。通过安全培训和意识提升,使其了解和掌握安全防护的基本知识和技能,加强对系统安全问题的认识和应对能力。针对机器人系统中可能出现的安全隐患和数据泄露事件,建立有效的应急响应机制。这包括制定紧急响应计划、明确责任分工、及时处理安全事件等,以便迅速应对和解决安全问题,保障机器人系统的安全运行。

7 总结

隧道智能巡检机器人系统结合了先进的机器人技术与物联网的无损传感技术,实现了隧道内部设备运行状态信息的实时、连续、动态采集。通过物联网工程传感器及数据交互技术,该系统能深入分析隧道内多种状态特征,全面了解隧道在运行过程中因各种事件或因素所引发的变化,并作出相应的应对措施。

该系统利用先进的传感器数据感知来判断异常事件的发生、位置及程度,提高了判断的准确性,缩短了响应时间。一旦发现异常事件,系统会立即评估其对隧道正常运行的影响程度,并在必要时触发预警信号。

综上所述,隧道智能巡检机器人系统为隧道的维修、养护与管理决策提供了强有力的依据与指导,在特殊气候、交通条件或隧道运行状况严重异常时,确保预警的及时性与准确性,为保障隧道安全运行发挥了重要作用。

参考文献

- [1]王志刚,李明.高速公路隧道火灾监测及应急处置研究[J].中国安全科学学报,2020,30(3):24-30.
- [2]高伟,陈昊,赵磊等.基于物联网的隧道监测与预警系统研究[J].公路工程,2018,43(2):128-133.
- [3]Zhang, Y., Li, X., & Zhao, Y. (2021). Research on tunnel safety monitoring system based on IoT and machine learning. *Journal of Sensors*, 2021, 1-11.
- [4]张建华,刘鹏.隧道智能巡检机器人的设计与实现[J].计算机工程与应用,2019,55(6):78-83.
- [5]Li, H., Wu, T., & Zhang, M. (2020). Real-time detection and tracking of road anomalies in tunnels using deep learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(5), 2148-2157.
- [6]赵龙,黄勇.基于多传感器融合的隧道环境监测系统设计[J].传感器与微系统,2022,41(7):98-102.
- [7]Wang, Z., & Li, Q. (2020). Development of a smart tunnel inspection robot system based on IoT technology. *IEEE Access*, 8, 135934-135941.
- [8]刘宁,陈浩.基于机器视觉的隧道异常事件检测技术研究[J].计算机工程,2018,44(5):44-49.