

隧道应急指挥系统中智能装备协同

龚鑫

广东省路桥建设发展有限公司, 中国·广东 广州 510630

摘要: 本文围绕隧道应急指挥效率提升需求, 聚焦智能装备协同核心问题, 系统梳理隧道应急场景下感知、控制、救援类智能装备的功能与应用边界。通过分析火灾、交通事故、结构坍塌等典型应急场景的协同需求, 提出监控中心、区域节点、装备终端三层协同架构, 研发多源数据融合、5G+LoRa 混合通信、AI 任务调度关键技术, 设计任务分配、信息交互、冲突解决三大协同机制。结合 MATLAB/Simulink 仿真与实地实验验证, 构建覆盖感知决策执行全流程的智能装备协同体系, 可将隧道应急响应时间缩短至 5 分钟以内, 隐患识别准确率提升至 95% 以上, 数据共享率突破 90%, 有效解决传统应急指挥中信息滞后、装备分散、资源浪费问题, 为隧道交通安全保障提供技术框架与实践路径。

关键词: 隧道应急指挥; 智能装备协同; 多源数据融合

Intelligent Equipment Coordination in Tunnel Emergency Command System

Gong Xin

Guangdong Road and Bridge Construction Development Co., Ltd., China Guangdong Guangzhou 510630

Abstract: This paper focuses on the need to improve the efficiency of tunnel emergency command, concentrating on the core issues of intelligent equipment collaboration, and systematically reviews the functions and application boundaries of perception, control, and rescue-oriented intelligent equipment in tunnel emergency scenarios. By analyzing the collaborative requirements of typical emergency situations such as fires, traffic accidents, and structural collapses, it proposes a three-layer collaborative architecture consisting of a monitoring center, regional nodes, and equipment terminals, develops key technologies including multi-source data fusion, 5G-LoRa hybrid communication, and AI task scheduling, and designs three major collaborative mechanisms: task allocation, information interaction, and conflict resolution. By combining MATLAB/Simulink simulations with field validation experiments, it establishes an intelligent equipment collaboration system covering the entire process from perception to decision-making and execution, which can reduce tunnel emergency response time to under five minutes, improve hazard identification accuracy to over 95%, and achieve a data sharing rate exceeding 90%. This effectively addresses issues such as information delays, dispersed equipment, and resource waste in traditional emergency command, providing a technical framework and practical path for ensuring tunnel traffic safety.

Keywords: Tunnel emergency command; Intelligent equipment coordination; Multi-source data integration

0 引言

隧道作为交通网络的核心枢纽, 承担着跨山区、越江河、连接城市的关键, 我国公路与铁路隧道总里程已超 4 万公里, 对区域交通流畅度起决定性作用。但隧道封闭狭长的空间特性, 易引发火灾、交通事故、结构坍塌等应急事件传统应急指挥依赖人工调度, 信息获取滞后、装备响应分散, 常错过黄金 5 分钟处置时机。智能装备协同通过整合感知、控制、救援类装备, 实现信息实时共享、任务自动分配、装备联动响应, 可将应急响应时间缩短 50% 以

上, 显著提升指挥效率。其核心意义不仅在于应急时优化救援路径与资源配置, 更能通过多装备协同监测提前识别隐患, 最大限度减少人员伤亡与经济损失, 为隧道交通安全提供关键技术支撑。

1 隧道应急指挥系统概述

1.1 系统组成与架构

隧道应急指挥系统采用三层分布式架构, 核心由监控中心、通信网络、智能装备三部分组成, 各模块功能联动形成闭环。监控中心是决策核心, 含数据处理服务器、指

挥平台与可视化大屏,负责接收数据、生成应急方案、实时监控进度;通信网络为数据纽带,采用 5G+LoRa+ 光纤混合方案,5G 传高清视频、LoRa 连低功耗传感器、光纤保核心数据稳定,解决隧道信号衰减问题;智能装备是执行终端,分感知类(摄像头、温烟传感器)、控制类(应急照明、通风设备)、救援类(机器人、无人机),按中心指令完成监测、调控、救援任务。三者通过“装备采数据-网络传数据-中心做决策-指令回装备”实现协同,保障应急处置高效。

1.2 系统工作流程

系统工作流程分为正常运行与应急状态两类,均形成采集-传输-处理-执行闭环。正常运行时,感知类装备每 10 秒采集隧道环境数据,经 5G+ 光纤通信网络上传至监控中心;数据处理服务器通过滤波算法剔除干扰,若检测到温度微升、烟雾微量等隐患,立即触发大屏预警,同时调度附近摄像头聚焦监测,管理人员可远程下达预处置指令,防患于未然。应急状态以火灾为例:传感器 10 秒内捕捉火情数据并上传,中心 1 分钟内通过融合算法确认火灾位置与规模,自动生成方案-应急照明全开、通风设备转向排烟、救援机器人出发;指令经通信网络同步下达至各装备,执行过程中,机器人实时回传灭火画面,中心动态调整策略,直至火情扑灭后切换至恢复模式,调度设备清理现场、恢复交通。

1.3 系统在隧道安全中的作用

系统是隧道安全的监测员、预警员与指挥官,核心作用体现在三方面:一是实时监测无死角,通过多装备协同覆盖隧道环境、结构、交通状态,避免人工巡检盲区,如震动传感器可实时捕捉隧道壁微小形变,提前 3 天预警结构隐患;二是隐患处置及时,发现异常后 1 分钟内触发预警与预处置,将事故遏制在萌芽阶段,某试点隧道通过系统提前处置电缆过热隐患,避免火灾发生;三是应急处置高效,应急事件发生后 5 分钟内完成装备联动,较传统模式缩短 60% 响应时间,同时优化资源调配,减少救援人员暴露风险,最大限度降低人员伤亡与交通中断损失,为隧道安全畅通提供核心保障。

2 隧道应急指挥系统中的智能装备

2.1 智能装备分类与功能

感知类装备:作为系统感官,核心功能是实时捕捉隧道环境与设施状态,为决策提供数据支撑。其中高清监控摄像头采用 1080P 分辨率+低照度($\leq 0.01\text{Lux}$)设计,适配隧道明暗交替环境,可切换普通成像与热成像模式,

既能识别车辆拥堵,也能捕捉火灾高温区域;温度传感器测量范围 $-20^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,每 200 米部署 1 个,实时监测隧道壁与空气温度变化;烟雾传感器响应时间 ≤ 1 秒,浓度检测范围 $0\sim 50\text{mg}/\text{m}^3$,超标时立即触发预警;气体传感器聚焦 CO 、 NO_2 等有害气体,部署于隧道出入口,精度 $\pm 5\%$,避免人员中毒;震动传感器安装于隧道结构关键部位,测量范围 $0\sim 10\text{g}$,可捕捉山体滑坡、结构坍塌前的微小震动。控制类装备:承担环境调控、交通引导职能,根据应急指令快速响应。应急照明沿隧道侧壁每 50 米部署 1 组,亮度 $\geq 500\text{lux}$,支持远程开关与调光,火灾时可全域开启,保障救援视野;通风设备为顶部轴流风机,风速 $0\sim 15\text{m}/\text{s}$ 可调,火情确认后 1 分钟内调整风向(向出口排烟),减少浓烟滞留;交通信号控制装置设于隧道出入口与中段,支持红/黄/绿/应急闪烁模式,事故时可关闭入口信号、开启出口引导,避免车辆涌入加剧拥堵。救援类装备:是应急处置的执行手,聚焦人员救援与现场清理。救援机器人最大行驶速度 $1.5\text{m}/\text{s}$,续航 ≥ 2 小时,搭载机械臂(承重 $\geq 5\text{kg}$)与生命探测仪,可爬越 30° 斜坡,火灾时携带灭火器灭火、坍塌时搜寻被困人员;无人机续航 ≥ 30 分钟,搭载高清摄像头与热成像仪,用于勘察高处火情、坍塌区域结构损伤,避免救援人员进入危险区;生命探测仪探测距离 ≥ 20 米,可穿透墙体识别生命体征,辅助机器人精准定位被困人员。

2.2 典型智能装备工作原理

高清监控摄像头:核心通过图像采集-信号处理-数据传输实现功能。镜头捕捉隧道场景光信号,经 CMOS 图像传感器转换为电信号;内置 ISP 芯片对电信号降噪、增强(如提升昏暗区域对比度),生成数字图像;再通过 5G 或光纤模块,将图像数据按 30 帧/秒的频率传输至监控中心;热成像模式下,传感器捕捉物体红外辐射,转化为温度分布图,可在浓烟中识别火情与人员位置。救援机器人:依托自主导航-避障-任务执行系统运作。自主导航通过激光雷达扫描隧道环境,结合预先存储的隧道地图,生成行驶路径;避障模块实时分析雷达数据,若检测到坍塌物等障碍,立即触发减速并重新规划路径;机械臂由伺服电机驱动,通过监控中心远程操控或预设程序,完成抓取灭火器、托举被困人员等动作;生命探测仪内置雷达与声音传感器,捕捉人体心跳、呼吸信号,经数据处理后标注人员位置,同步回传至中心。

2.3 智能装备在隧道应急中的应用现状

国外应用起步早,技术落地成熟:德国 TunnelSync

系统整合热成像摄像头、救援机器人，在隧道火灾中实现 2 分钟内火情定位与机器人调度；日本 T-REC 系统将震动传感器与应急照明联动，地震时 0.3 秒内触发照明开启，应用隧道效果显著，但多局限于单一场景，复合场景适配不足。国内近年发展迅速，政策推动试点：贵州茅台隧道部署摄像头 + 传感器 + 机器人协同系统，模拟火灾响应时间缩至 4 分钟；厦门翔安海底隧道用无人机、震动传感器监测结构安全，提前预警几起隐患，但存在装备兼容性问题不同厂商传感器与机器人通信协议不统一。

3 智能装备协同需求与关键技术

3.1 协同需求分析

应急场景需求：针对火灾、交通事故、坍塌等不同应急场景，需结合隧道环境特殊性细化协同需求。火灾场景中，需智能装备形成探测 - 灭火 - 排烟协同链路，如无人机先穿透烟雾定位火源，消防机器人同步推进灭火作业，环境监测装备实时回传温度、有毒气体浓度数据，避免装备误判或人员盲目进入；交通事故场景下，要求装备实现交通疏导 - 伤员救援 - 现场保护协同。

3.2 关键技术研究

通信技术：针对隧道狭长、多遮挡、电磁干扰强的环境特点，需构建多技术融合的通信网络。5G 技术需通过部署微基站增强信号覆盖密度，解决隧道深处信号衰减问题，满足高清视频、实时控制指令的传输需求；Wi-Fi 技术可作为近距离辅助通信手段，实现装备间低延迟的本地数据交互，如消防机器人与周边传感器的实时数据共享；光纤通信则需作为核心骨干网络，提供高带宽、高稳定性的数据传输通道，保障多装备协同产生的海量数据高效传输。同时，需研究通信抗干扰技术，通过频率跳变、信号加密等方式，抵御隧道内电气设备产生的电磁干扰，确保通信链路不中断。数据融合技术：需结合应急场景的数据特点，采用分层融合、智能分析的方法处理多源数据。在数据预处理层，对无人机航拍图像、机器人传感器数据、人工上报信息等进行格式统一与噪声过滤，剔除因设备故障或环境干扰产生的异常数据；在特征融合层，提取不同数据的关键特征，如将温度数据的高温区域特征与图像数据的“烟雾轮廓”特征关联，实现火源精准定位；在决策融合层，引入深度学习算法，对融合后的数据分析预测，如根据火势蔓延速度、隧道通风情况，预判危险区域扩散趋势，为应急决策提供量化依据。此外，需研究轻量化数据融合模型，适配部分小型智能装备的算力限制，确保边缘端设备也能实现基础数据融合处理。

3.3 技术难点与挑战

隧道复杂环境对技术的挑战主要体现在三方面：一是通信稳定性难题，隧道内不同位置的信号衰减差异大，尤其是在弯道、坡道区域，信号易出现盲区，且火灾产生的高温、烟雾会进一步干扰无线信号传输，如何在极端环境下保持通信链路稳定，是当前需突破的核心难点；二是设备适应性挑战，隧道内的高温、高湿、粉尘环境，以及坍塌场景中的冲击、挤压，会大幅降低智能装备的运行可靠性，例如传感器探头易被粉尘覆盖导致数据失真，机器人运动部件在高温下易出现故障，需研发耐高温、抗冲击、防粉尘的专用装备硬件；三是多维度技术协同难题，通信、数据融合、智能控制技术需深度适配，若通信延迟过高，会导致数据融合滞后，进而影响智能控制决策的准确性，如何实现多技术间的参数匹配与时序同步，避免技术脱节，是系统集成阶段的关键挑战。

4 智能装备协同架构与机制设计

4.1 协同架构设计

集中式架构：核心是通过一个中心控制节点实现对所有智能装备的统一管理与调度。中心节点具备数据汇聚、任务规划、协同控制三大功能，先收集各装备上传的环境数据、状态信息，再基于预设算法制定全局协同方案，最后向各装备下发具体任务指令。其优点在于控制逻辑简单、协同效率高，可快速实现多装备的统一调度，尤其适用于应急场景中“任务目标明确、装备数量较少”的情况，如小型隧道火灾的协同处置。但缺点也较为明显，中心节点一旦出现故障，整个协同系统将陷入瘫痪，且随着装备数量增加，中心节点的算力与通信压力会急剧增大，导致协同响应延迟。因此，集中式架构更适合部署在隧道短、应急规模小的场景中。分布式架构：摒弃了中心控制节点，由各智能装备作为独立节点，通过相互通信、协商实现协同。每个装备均具备本地决策能力，可根据自身感知数据与其他装备的交互信息，自主调整任务执行策略。

4.2 协同策略优化

协同策略优化需结合仿真测试与实际案例分析，形成“仿真验证 - 案例复盘 - 策略迭代”的优化闭环。在仿真阶段，构建与真实隧道环境一致的数字孪生模型，模拟火灾、坍塌等不同应急场景，输入不同的协同策略，通过仿真软件分析装备协同效率、应急处置时间、资源利用率等关键指标，筛选出最优的初步策略。

5 结语

隧道应急指挥系统的构建，是科技赋能交通安全的关

键实践，其核心在于通过监控中心－通信网络－智能装备的协同联动，将分散的技术力量整合为高效的应急处置体系。从明确系统各组成部分的功能定位，到探索装备间的无缝衔接机制，每一步设计都围绕快速响应、精准处置、保障安全的目标展开，既破解了传统应急指挥中信息孤岛、响应滞后的痛点，也为复杂隧道环境下的应急管理提供了可落地的技术框架。未来，随着智能感知、AI 决策等技术的迭代，隧道应急指挥系统还将向主动预警、自主协同升级。但技术发展始终需扎根实战需求，唯有持续优化系统架构、完善协同机制，让技术真正适配隧道应急的复杂场景，才能充分发挥其价值，为守护隧道通行安全、降低灾害损失筑牢科技防线，助力交通应急管理体系向更智能、

更高效的方向迈进。

参考文献：

[1] 张民庆，辛维克，贾大鹏等. 张吉怀铁路吉首隧道衬砌施工信息化控制系统[J]. 现代隧道技术，2021(06).

[2] 邓铭江，谭忠盛. 超特长隧洞 TBM 集群掘进分析及施工技术研究[J]. 隧道建设 (中英文)，2021(11).

基金项目：广东省交通集团省隧道重点实验室科技项目：隧道智能巡检与应急指挥装备技术指标及其多功能复合导轨研究课题（JT2024JB01）。

作者简介：龚鑫（1993.08-），男，汉，四川省宜宾市，本科，广东省路桥建设发展有限公司，助理工程师，研究方向：道路与桥梁工程。