

高速公路特长隧道火灾事故机电系统应急联动技术研究

王锦锐¹ 郭季^{*1} 朱家亮²

1. 云南省交通投资建设集团有限公司 云南 昆明 650228

2. 云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650051

摘要: 特长隧道火灾事故具有烟雾扩散迅速、能见度下降快、人员疏散与消防救援难度大等特点, 机电系统应急联动响应的及时性协同性直接决定事故处置成效。本文依托高速公路特长隧道火灾应急救援关键技术研究及工程示范项目, 立足特长隧道火灾事故特征与应急处置需求, 系统梳理了机电系统应急联动核心功能, 分析当前联动响应中存在的信息孤岛、响应迟滞、控制脱节等突出问题, 结合项目研发的隧道火灾监测预警系统、智能火灾扑救系统、声光电应急疏散引导装置及隧道消防应急管理平台等成果, 提出了机电系统应急联动技术框架与具体联动策略, 以期提升特长隧道火灾事故应急处置能力提供参考。

关键词: 特长隧道; 火灾事故; 机电系统; 应急联动; 智能管控; 应急管理平台

引言: 截至 2025 年底, 我国公路隧道总里程已超 30000 公里, 特长隧道数量持续增长。隧道空间封闭, 火灾时烟雾积聚快、能见度骤降, 人员逃生与消防救援极为困难。事故教训表明, 通风排烟失效、交通管控滞后、信息发布不畅是事故扩大的主因, 根源在于机电系统应急联动能力不足。当前各子系统多独立运行, 缺乏有效的信息共享与联动控制, 严重制约处置效率。本文依托高速公路特长隧道火灾应急救援关键技术研究及工程示范项目, 基于火灾监测预警系统、智能火灾扑救系统、声光电疏散引导装置及消防应急管理平台等研发成果, 研究机电系统应急联动关键技术, 提出系统化联动控制策略, 为隧道运营安全提供技术支撑。

1 特长隧道火灾事故特征与应急处置需求

1.1 火灾事故演化规律与烟气扩散特征

特长隧道火灾发展通常经历初期起燃、快速增长、充分发展和衰减熄灭四个阶段。从点火到形成全面燃烧的时间窗口极为有限, 一般仅为 5~15 分钟, 封闭空间导致热量积聚快、烟气蔓延迅速。隧道火灾产生的浓烟和有毒气体会迅速扩散, 使能见度在数分钟内降至 1 米以下, 严重威胁人员生命安全。烟气扩散方面, 隧道内纵向风速对烟气分层和扩散距离起决定性作用。当纵向风速低于临界风速时, 烟气会形成逆流层向上游蔓延, 严重影响上游人员逃生; 风速过高则可能破坏烟气分层、扰乱下游能见度分布。烟雾颗粒与有毒气体 (CO、CO₂、NO_x 等) 的耦合扩散, 使隧道内环境在数分钟内恶化至危险阈值以上^[1]。项目研究表明, 不同火灾规模下临界风速存在显著差异, 需根据火源热释放率动态调整

通风策略。

1.2 应急处置核心需求分析

火灾发生时, 现场人员需在能见度尚可的窗口期内沿逃生通道撤离至安全区域或横通道。消防救援力量需从外部快速抵达, 依赖机电系统提供实时火场信息、通畅的通信保障和必要的通风排烟支持。机电系统的响应速度直接决定了“逃生窗口”与“救援窗口”是否有效衔接。应急处置的核心需求可归纳为四个方面: 一是快速感知与精准定位——需要在火灾初期即实现准确探测并确定火源位置; 二是智能决策与协同控制——根据火源位置、火势规模、交通流量等因素自动生成联动方案; 三是高效执行与闭环反馈——各子系统按预案协同动作并实时反馈执行状态; 四是信息共享与多方协同——实现隧道现场、监控中心、消防救援部门之间的信息互通与指挥联动。四个方面的需求环环相扣, 贯穿应急处置全过程。

2 机电系统应急联动核心功能需求

火灾工况下, 机电系统应急联动的核心功能可归纳为“感知—决策—执行—通信—评估”五个环节的闭环响应链。

2.1 感知功能

感知功能是应急联动的起点, 要求在火灾初期即实现准确探测, 包括火焰特征识别、温度精细化监测、环境参数采集及道路异物识别。项目研发了点型红外火焰探测器与图像型火焰探测器, 能够精准识别火焰特征; 配套研发的红阵监控仪及红阵控制器, 可实现隧道多分

区精细化温度监测,为火灾早期温感预警提供可靠数据支撑。智能巡检机器人集成多类探测与成像设备,可同步完成隧道内有毒有害气体检测、环境参数采集及道路异物识别,替代人工开展全天候常态化巡检与火灾隐患动态排查。所有设备均通过权威第三方检测校准。

2.2 决策功能

决策功能是应急联动的中枢,要求基于预设的联动控制策略,自动生成通风排烟方案、交通管控指令和人员疏散引导方案。需根据火灾位置、火势规模、交通流量、气象条件等动态因素进行智能调整。项目构建了隧道火灾风险动态综合演化评估模型,结合火灾工况下人员疏散速度模型和路径选择模型,为智能决策提供了理论支撑^[2]。

2.3 执行功能

执行功能是应急联动的落脚点,要求通风系统按预案切换至火灾排烟模式,照明系统调整亮度与色温,交通信号灯和情报板更新通行状态,广播系统启动语音引导。项目研发的车载或轨道式自动喷灭系统、风幕墙烟气隔离系统、声光电应急疏散引导装置等功能装备,有效提升了现场执行能力,实现了火灾扑救、烟气控制和人员疏散引导的协同联动。

2.4 通信功能

通信功能是应急联动的保障,要求建立事故现场与监控中心、消防救援部门之间的多级通讯链路,确保应急指令下达与现场信息上传的实时畅通。项目研发的路鸿智联电话广播设备、IP网络可视化寻呼话筒、IP网络音柱、号角喇叭等终端设备,分别覆盖高清可视对讲、多模式网络广播、远距离高声压扩音等应用场景,满足隧道内日常通讯与应急播报的差异化需求。配套研发的平台模块与网络管理主机构建起系统管理与控制中枢,可实现隧道内所有广播通讯终端的统一调度与应急联动控制。

2.5 评估功能

评估功能是持续改进的依据,要求记录火灾响应全过程数据,包括感知触发时间、决策响应时延、各子系统动作执行状态及恢复过程等关键节点信息,为事后复盘分析、预案优化完善和设备系统升级提供可靠的数据基础。

3 当前机电系统联动响应存在的主要问题

3.1 子系统信息孤岛现象突出

火灾报警、通风、照明、监控、广播等子系统由不同供应商建设,接口协议不统一、数据格式不一致,缺乏统一的集成管理平台对各系统进行集中管控。各系统

独立运行,火灾报警信号无法直接触发射频系统启动应急广播,视频监控确认的火情也无法自动调用通风系统切换排烟模式。一旦发生火灾,各系统各自为战,难以形成协同效应,监控员需通过多套操作界面分别下达指令,严重制约了应急响应效率。

3.2 联动响应流程存在时序脱节

从火灾确认到通风启动、信号切换、广播引导等关键动作之间存在人工确认环节和指令传递延迟。监控员需在确认火情后依次操作不同系统界面,每一个操作步骤都引入额外的时间损耗,导致联动响应整体耗时偏长。特别是在夜间或交通量较大时,监控员工作负荷增加,人工确认的准确性和及时性更加难以保障,未能充分发挥机电系统快速响应的设计优势,延误了最佳处置时机。

3.3 控制策略缺乏自适应能力

现有联动策略多为固定预案式,即预设若干典型火灾场景及其联动方案,实际发生时由监控员选择调用。然而,火源位置、火势规模、交通流量、气象条件等工况极为复杂多变,固定预案难以覆盖各类组合场景,更无法根据实时反馈进行动态优化。不同火灾场景下通风排烟、交通管控、疏散引导的需求差异较大,当实际工况偏离预案假设条件时,固定策略可能导致处置效果不佳^[3]。

3.4 设备可靠性与冗余配置不足

部分隧道机电设备长期在高湿、粉尘、振动等恶劣环境中运行,老化严重,故障率逐年上升,备品备件储备不足。火灾高温环境下,排烟风机可能因电机过热停机,应急照明蓄电池容量衰减失效,通信设备因线路受损中断,关键设备失效风险进一步加剧。由于缺乏有效的冗余切换机制,关键节点一旦失效将直接导致整个联动链条中断,备用设备的自动切换功能多未经验证,实际可用性难以保证。

4 机电系统应急联动技术框架与联动策略

4.1 总体技术框架

针对上述问题,依托项目研究成果,构建“感知—决策—执行—通信—评估”五位一体的机电系统应急联动技术框架。在感知层,集成点型红外火焰探测器、图像型火焰探测器、红阵监控仪、智能巡检机器人等多源感知设备,实现火焰特征识别、温度精细化监测、有毒有害气体检测及道路异物识别的全覆盖。在决策层,依托隧道火灾风险动态综合演化评估模型,结合火灾工况下人员疏散速度模型和路径选择模型,自动生成最优联动方案。在执行层,集成车载或轨道式自动喷灭系统、风幕墙烟气隔离系统、声光电应急疏散引导装置等智能

装备,确保联动指令高效落地。在通信层,依托 IP 网络广播通讯系统,实现高清可视对讲、多模式网络广播、远距离高声压扩音的融合通信。在评估层,依托隧道消防应急管理平台,实现全过程数据记录与复盘分析。

4.2 通风排烟联动策略

火灾确认后,系统根据火源位置和火灾规模自动选择排烟模式(纵向排烟、横向排烟或组合排烟)。基于项目火灾临界风速研究成果,计算并动态调控临界风速,防止烟气逆流;同时根据烟雾传感器数据动态调整风机运行组合,保持逃生通道相对清晰。对于新能源汽车火灾等特殊场景,需针对性调整通风策略,防止有毒有害气体大量积聚。

4.3 声光电应急疏散引导策略

火灾模式下,系统自动激活声光电应急疏散引导装置。通过绿色诱导灯指示逃生方向,红色警示灯禁止进入危险区域;启动预录制的语音广播,指导人员有序撤离;通过 IP 网络可视化寻呼话筒实现监控中心与现场的实时对讲,为被困人员提供精准引导。声光电多种手段协同作用,确保在烟雾浓重、能见度极低的条件下,人员仍能清晰识别逃生路线。

4.4 交通管控与信息发布联动策略

系统联动隧道入口及洞内可变情报板发布事故信息与通行指令,同步将信号灯切换至管制状态。联动策略需根据火灾位置和交通流量动态调整封闭距离和分流方案。所有信息通过隧道消防应急管理平台统一发布,确保信息一致性和及时性。

4.5 智能灭火与烟气隔离联动策略

火灾确认后,系统自动启动车载或轨道式自动喷灭系统,对火源实施精准扑救;同时启动风幕墙烟气隔离系统,将烟气控制在有限区域内,防止其大面积扩散蔓延。智能巡检机器人可抵近火源区域,实时回传火场影像和环境参数,为指挥决策提供现场信息支撑。

5 应急联动效能提升的关键措施

5.1 建设统一的隧道消防应急管理平台

将各子系统纳入统一管理,实现数据标准化接入、跨系统联动策略配置和全流程可视化管控,是消除信息孤岛的核心手段。项目已搭建完成云南交投集团隧道消防应急管理平台,实现了预警、扑救、疏散等系统装备的集成联动,并在云交科智慧隧道中试基地开展了示范应用。下一步应进一步优化平台功能,提升跨系统协同效率。

5.2 建立多级协同的应急指挥体系

依托 IP 网络广播通讯系统和网络管理主机,构建隧道现场—监控中心—消防救援部门三级协同指挥体系。统一调度所有广播通讯终端,实现应急联动控制。同时建立定期通信测试和联合演练机制,确保应急状态下各级指挥链路畅通^[5]。

5.3 推进智能决策辅助能力建设

基于项目构建的隧道火灾风险动态综合演化评估模型,在隧道消防应急管理平台中嵌入智能决策辅助模块,根据实时感知数据动态推荐最优联动方案,辅助监控员快速决策。随着数字孪生和 AI 推理技术在隧道工程中的深度融合应用,应急决策正从“人工判断”向“智能辅助”转变。

5.4 强化设备运维与冗余保障

对火灾排烟风机、应急照明、通信广播等关键节点配置冗余热备,确保高温或单点故障下系统仍可基本运行。建立机电设备全生命周期健康档案,实施预防性维护,定期开展设备功能测试。项目成果中各类设备均已通过权威第三方检测校准,为设备可靠性提供了基础保障。

结束语

特长隧道火灾事故应急处置高度依赖机电系统协同联动。本文依托高速公路特长隧道火灾应急救援关键技术研究及工程示范项目,从火灾演化规律和应急处置需求出发,分析了当前机电系统联动中的突出问题,构建了“感知—决策—执行—通信—评估”五位一体联动技术框架,结合项目研发的火灾监测预警系统、智能巡检机器人、IP 网络广播通讯系统、声光电应急疏散引导装置及隧道消防应急管理平台等成果,提出了具体联动策略与效能提升措施。实践表明,打破子系统壁垒、优化响应流程、引入智能决策、强化设备运维是提升联动效能的关键路径。

参考文献

- [1] 周庆,陈建,方建钢.基于实战的高速公路特长隧道车辆火灾事故消防救援研究[J].中国应急救援,2021(3):17-20.
- [2] 皮胡杰,张灿程.公路隧道火灾报警与细水雾灭火系统联动试验研究[J].交通企业管理,2026,41(4):143-145.
- [3] 陈建.特长高速公路隧道火灾灭火救援的思考[J].今日消防,2021,6(7):9-12,16.
- [4] 雷文君,郭丽丽,赵旭明,等.补风方式对地铁隧道火灾烟气控制效果的研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2025,7(2):31-41.