高速公路特长隧道消防应急管理平台的设计与实现

曹 瑛[1] 郭 季*[,2] 聂小龙[1]
1. 云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650051
2. 云南省交通投资建设集团有限公司 云南 昆明 650228

摘 要：特长隧道运营安全面临火灾监测手段单一、应急联动效率不足、设备状态掌握有限等突出难题，亟需依托信息化手段实现消防应急管理从“各自为战”向“协同联动”转变。本文结合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，针对隧道火灾应急管理实际需求，设计了集监测预警、智能决策、联动控制、设备管理和应急指挥于一体的消防应急管理平台，明确了平台的总体架构、功能模块、数据流程及部署方案，并结合隧道消防设施现状阐述了平台的关键技术实现路径。平台建成后将在云南交投集团所辖特长隧道开展示范应用，为提升隧道火灾事故应急响应效率和协同处置能力提供技术支撑。

关键词：特长隧道；消防应急管理平台；监测预警；应急联动

引言：我国公路隧道建设规模持续扩大，特长隧道数量逐年攀升。隧道作为半封闭空间结构，一旦发生火灾，火情信息获取受限、烟雾扩散难以监控、初期扑救效果不佳、消防设施状态掌握不足等问题相互叠加，严重制约应急处置效率。当前隧道消防管理普遍采用各子系统独立运行模式，火灾报警、通风照明、广播通信、消防灭火等系统之间缺乏有效的信息共享与联动控制机制，难以实现“感知—决策—执行—评估”的闭环管理。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，针对隧道火灾应急管理实际需求，研究设计消防应急管理平台，以实现隧道消防设施的统一管理、火灾信息的快速汇聚、应急响应的协同联动，为特长隧道消防安全管理提供信息化支撑手段。

1 隧道消防应急管理的现状与需求分析

1.1 当前隧道消防应急管理存在的主要问题

现阶段特长隧道消防应急管理存在四个方面突出问题。一是火情信息获取有限。 现有火灾探测手段以点式烟感和温感为主，对车辆运行火灾征兆的主动感知能力不足，火情确认依赖人工视频巡检，信息获取滞后。二是消防设施状态掌握不足。 各类消防设备的实时运行状态缺乏统一监测手段，设备是否处于完好待用状态底数不清，应急时可用的消防资源不明。三是应急响应协同性差。 火灾报警、通风排烟、交通管控、广播疏散等环节缺乏统一调度，各系统独立响应，应急指令传递链条长、协同效率低。四是烟雾扩散监控与疏导能力不足。火灾烟雾扩散后难以持续追踪其蔓延范围，疏散路径选择缺乏实时数据支撑，影响人员逃生和消防救援决策。

1.2 隧道消防应急管理的核心需求

基于上述问题，隧道消防应急管理应满足六方面核心需求。一是全域感知——集成视频、烟感、温感、激光幕墙等多源感知手段，实现火灾征兆主动探测与快速预警。二是状态可视——实时掌握消防设备设施运行状态，确保应急时“拉得出、用得上”。三是智能决策——基于火灾工况自动生成通风排烟、交通管控、疏散引导等联动方案。四是协同联动——打通各子系统壁垒，实现预警、扑救、疏散的系统级协同响应。五是全程追溯——记录响应全过程数据，支持事后复盘与预案优化。六是工程适配——平台功能与现有隧道消防设施兼容，具备良好的可部署性和可扩展性[1]。

2 消防应急管理平台总体设计

2.1 设计目标与原则

平台设计围绕“全面监测、智能预警、协同联动、高效处置”的总体目标，遵循四项原则。统一标准原则——统一数据接口与通信协议，实现各子系统标准化接入，消除信息孤岛。集成联动原则——将监测预警、扑救控制、疏散引导、指挥调度等功能模块集成于统一平台，实现系统间协同响应。实用可靠原则——界面简洁、操作便捷，降低监控人员使用门槛，确保应急状态下系统稳定运行。可扩展原则——预留接口支持后续设备接入和功能升级，适应技术进步和业务发展需求。

2.2 总体架构设计

平台总体架构采用“五层两体系”设计。“五层”自下而上依次为：数据采集层，负责对接隧道内各类感知设备、消防设施和控制系统，完成数据标准化采集与预处理；数据传输层，依托工业以太网和光纤通信网络，实现现场设备与平台之间的可靠数据传输；数据存

储层，承担监测数据、设备信息、预案库、历史记录等数据的存储与管理；业务逻辑层，为核心业务层，部署监测预警、设备管理、预案管理、联动控制、应急指挥等业务模块，实现消防应急管理各项功能；应用展示层，面向监控中心值班人员和应急指挥人员，提供可视化监控大屏、操作终端和移动端应用。“两体系”包括标准规范体系和安全保障体系，贯穿五个层级，保障平台的标准化接入和运行安全。

3 平台核心功能模块设计

3.1 综合监测预警模块

综合监测预警模块承担着隧道火灾“早发现、快确认”的首要职责。模块集成视频图像火焰识别、烟感温感报警、激光幕墙异物探测等多源感知技术，对监测数据进行实时汇聚与交叉验证，在火灾初期即捕捉异常信号并触发预警。监控大屏以隧道区段为单元展示各感知设备的实时状态，报警信息按紧急程度以红、橙、黄三色分级显示，辅助监控员快速定位火源位置并完成人工确认[2]。通过多源数据相互印证，有效降低单一探测手段的误报率，缩短从异常发生到预警确认的时间窗口，为后续应急处置争取主动。

3.2 设备设施管理模块

隧道消防设备种类多、分布广，传统台账管理难以满足应急状态下的快速查询需求。设备设施管理模块对隧道内消防设备进行全生命周期的电子化管理，为每台设备建立独立档案，涵盖名称型号、安装位置、启用日期、检测记录等基础信息。模块与现场设备实时数据交互，动态更新运行状态（正常/待机/故障/离线），使管理人员随时掌握全线消防设施可用性底数。同时集成维护保养提醒功能，根据设备类型和运行时长自动生成保养计划，变“被动抢修”为“主动保养”，确保应急状态下设备拉得出、用得上。

3.3 应急联动控制模块

应急联动控制模块是平台实现多系统协同响应的核心。模块内置覆盖不同火源位置、火灾规模及交通流量组合工况的联动策略库。火灾确认后，模块根据实时火情信息自动匹配最优联动方案，通过统一指令接口并发触发通风排烟切换、交通信号管控、情报板信息发布、广播疏散引导等联动动作，大幅减少人工逐项操作的时间损耗。模块同时要求关键执行节点反馈确认机制，确保指令下达即执行、执行即有反馈，形成完整的指令闭环，实现从“人工串联”向“系统并联”的联动模式升级。

3.4 应急指挥调度模块

应急指挥调度模块为现场指挥提供统一的调度界面。模块将隧道内外视频监控、IP广播通讯终端、救援力量定位等信息集成于同一视图，指挥人员可实时掌握隧道内人员分布、烟雾扩散范围及救援力量抵达进度。模块支持与消防救援部门的音视频联动和信息共享，实现跨部门协同研判与联合指挥。在通讯保障方面，模块实现了隧道紧急电话、IP可视对讲、广播系统之间的互联互通，指挥人员可通过平台一键呼叫任意终端，也可建立多方语音会议，确保关键指令实时传达。

3.5 预案管理与演练模块

预案管理与演练模块推动应急预案从纸质文本向数字化、结构化的转型升级。模块支持多场景预案的编制、存储、动态更新和快速调阅，每份预案明确不同火灾工况下的联动策略与设备动作序列，应急处置时可一键调取。此外，模块内置桌面推演和模拟演练功能，可设定不同的起火位置、交通流量和气象条件，自动生成模拟场景以检验预案的适用性。演练过程各环节操作数据自动记录，结束后生成评估报告，帮助监控团队发现预案薄弱环节并持续改进。

3.6 数据分析与评估模块

数据分析与评估模块是平台实现“持续改进”闭环的关键环节。模块对每次火灾响应全过程进行自动记录，涵盖从报警首次触发到各联动节点动作的完整时间线，包括感知触发时刻、联动方案匹配耗时、各子系统指令下发与执行确认时延等关键指标。一次响应结束后，模块自动汇总生成评估报告，以时间轴图谱方式呈现各环节耗时分布，帮助管理人员识别响应链条中的瓶颈环节。长期运行积累的数据还可用于统计设备故障频率和处置成效，为预案优化和系统升级提供决策依据。

4 平台关键技术实现路径

4.1 多源数据融合的火灾智能感知技术

隧道火灾探测长期面临“报警信号多、确认火情难”的尴尬，单一探测手段往往难以兼顾灵敏性与准确性。平台将视频图像火焰识别、烟感温感报警、激光幕墙异物探测三种技术有机结合，通过边缘计算节点对三类数据进行时空关联与交叉验证，只有当两种以上感知手段确认异常时方才认定为有效火警，有效降低车辆尾气、环境温变等因素引发的误报。边缘节点完成初步融合后仅上传关键结果至云端，既减轻传输负担又保障了实时响应能力[3]。

4.2 基于鸿蒙系统的应急广播与通讯技术

隧道广播通讯设备长期面临品牌壁垒多、统一调度难的困境。项目采用国产鸿蒙操作系统作为软件底座，依托其分布式软总线技术实现电话广播设备、IP网络寻呼

话筒、网络音柱、号角喇叭等终端之间的互联互通与数据交互。鸿蒙的多设备协同能力使监控中心能够以“一张网”统一调度所有音频终端——日常各自独立运行，应急时一键切换为全隧道同步广播或分区定向喊话，为自主可控的隧道应急通讯提供了技术保障。

4.3 消防设施状态全时感知与故障预警技术

消防设施“平时无人问、急时不好用”是隧道安全管理的长期痛点。平台通过物联网网关以高频轮询方式实时采集排烟风机、消防水泵、应急照明等关键设备的运行状态参数，构建包含运行时长、故障频次、健康评分等维度的设备状态数据库。基于时间序列分析对设备劣化趋势进行预判，当某项指标偏离历史正常区间时自动推送预警，引导维护人员在设备失效前介入，变“事后抢修”为“事前预防”。

4.4 开放可扩展的平台架构设计

隧道消防管理需求随运营年限和设备更新不断变化，紧耦合架构难以适应。平台采用模块化、组件化设计思路，将六大功能模块设计为相对独立的组件，各模块通过标准化API接口交互，可根据隧道实际配置灵活组合——简单隧道部署精简版、智能化隧道启用全部功能。平台预留标准化数据接口，后续新增检测设备或第三方系统可按规范接入，避免因需求变化推倒重建，充分保护既有投资。

4.5 标准规范体系建设

平台建设的质量与可持续性取决于“有章可循”的程度。项目在技术开发的同时，同步编制数据接口标准、设备接入规范、联动控制协议、系统运维规程等技术文档，明确各类感知数据和控制指令的格式规范、设备接入条件与参数映射关系、各系统间指令交互格式与异常处理规则。这套标准规范既是平台建设的技术依据，也为后续同类平台的推广建设提供了可复用的技术参照，确保“建一个平台、成一套标准”。

5 平台部署与工程示范应用

5.1 部署方案

平台采用“两级部署、多端应用”方案。集团级数据中心部署核心服务器、数据库和平台主系统，汇聚各隧道现场数据，实现跨隧道统一监控与管理；隧道监控站部署边缘节点，承担本隧道数据采集与处理，在网络中断时仍可独立运行；应用终端包括监控中心大屏、操作员站和移动终端。

5.2 与现有消防设施的集成策略

平台设计遵循兼容利旧原则，通过协议转换网关将隧道内现有火灾报警控制器、通风控制系统、照明控制系统、交通信号控制器、广播通讯系统等接入统一平台，实现对存量设施的系统集成与协同管控[4]。

5.3 工程示范应用计划

平台将在云南交投集团所辖高速公路特长隧道开展工程示范应用，示范隧道总长度不少于20km。示范内容涵盖平台功能验证、系统联调测试、人员操作培训、运行效果评估四个阶段。通过示范应用，验证平台在真实隧道环境下的运行效果，形成可复制推广的建设方案和运维模式。

结束语

本文针对特长隧道消防应急管理面临的监测手段单一、联动效率不足、设备状态掌握有限等突出问题，结合相关科研项目，设计了一套集监测预警、智能决策、联动控制、设备管理和应急指挥于一体的消防应急管理平台。平台采用“五层两体系”架构，明确了六大核心功能模块，并从多源数据融合感知、鸿蒙系统通讯、设备状态全时感知等维度阐述了关键技术路径。平台将在云南交投集团所辖特长隧道开展示范应用，预期实现消防设施统一管理、火情信息快速汇聚、应急响应协同联动，有效提升火灾事故应急处置效率。

参考文献

[1]唐娅琴. 交通隧道消防联动控制系统应用与分析[J]. 建筑电气,2022,41(10):76-80.

[2]陈荣,马品成,韦万明,等. 基于NB-IoT技术的公路隧道消防应急设施远程监控系统[J]. 西部交通科技,2023(1):93-94,170.

[3]陈晓勇,董城,阳晓剑,等. 基于HFLTS-AHP的公路运营隧道火灾应急预案评估研究[J]. 现代职业安全,2026(7):17-20.

[4]郭庆华,朱合华,闫治国. 顶部开口自然通风隧道火灾竖井排烟效率研究[J]. 消防科学与技术,2021,40(5):661-664.