

大模型驱动的隧道火灾风险动态预测与应急决策

蔡泽林 朱敏慧

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650041

摘要：文章聚焦大模型驱动的隧道火灾风险动态预测与应急决策核心议题。阐述隧道火灾诱发的核心设备故障类型及风险演化特征，构建基于大模型的隧道火灾风险动态预测模型，涵盖多源风险数据采集、模型选型优化与动态训练流程，实现火灾隐患精准预判与风险等级实时更新。基于风险预测结果，构建科学应急决策模型，系统分析决策关键因素、制定分级决策规则、生成动态评估方案。旨在通过大模型的强数据处理与推理能力，突破传统预测的静态局限，实现隧道火灾风险动态感知、精准预测与高效应急决策，筑牢隧道安全运行防线。

关键词：大模型；隧道火灾；风险动态预测；应急决策

引言：隧道作为交通网络的核心枢纽，空间封闭、工况复杂且人员车辆高度集中，一旦因设备故障、违规操作等引发火灾，火势易快速蔓延、烟气难以扩散，极易造成重大人员伤亡与财产损失。传统隧道火灾风险预测多依赖静态指标评估，存在滞后性强、预判精度不足等问题，应急决策也多凭经验制定，难以适配火灾动态演化态势。本文聚焦大模型在该领域的应用，构建全流程技术体系，实现从火灾风险动态预判到科学应急决策的闭环管控，为隧道安全应急管理提供理论支撑与实践范式。

1 隧道火灾风险与动态预测基础

1.1 隧道火灾诱发源与风险演化特征

隧道火灾的核心诱发源以设备故障为主，辅以车辆自燃、违规动火等因素，其中设备故障占比超60%，是风险防控的核心靶点。关键风险诱发设备包括：通风系统（轴流风机、射流风机故障导致烟气滞留）、电气设备（照明线路、控制箱短路漏电）、消防设备（火灾探测器失灵、灭火系统故障）及机电管控设备（联动系统失效延误预警）。隧道火灾风险演化呈现显著动态性，初期（1-3分钟）表现为局部高温、烟气微量扩散，中期（3-10分钟）火势快速蔓延、能见度骤降，后期易引发结构受损、交通瘫痪等次生风险，且受通风条件、车流密度、环境温湿度等因素动态影响，需实时追踪风险演化轨迹。

1.2 火灾风险动态预测核心内涵

隧道火灾风险动态预测是依托大模型技术，实现火灾隐患“事前预判、事中追踪、等级动态更新”的智能化管控模式，区别于传统静态评估的滞后性与片面性。其核心内涵在于以实时数据为驱动，精准捕捉火灾诱发的前兆信号，动态推演风险演化路径，量化不同时段的风险等级，为应急决策提供动态依据^[1]。预测过程贯穿火灾全生

命周期，事前通过设备运行数据与环境参数预判隐患概率，事中实时更新火势、烟气、车流等数据修正风险评估，事后复盘数据优化预测模型。核心目标是打破“静态评估-被动应对”的传统模式，实现火灾风险的早发现、早预警、早管控，为应急决策争取黄金处置时间。

2 基于大模型的隧道火灾风险动态预测模型构建

2.1 多源风险数据采集与预处理体系

数据采集是动态预测的基础，需构建覆盖“设备-环境-交通-应急”的全维度数据采集体系，保障预测精度。采集范围包括：风险诱发数据（设备运行参数：电压、温度、转速等；故障前兆信号：风机异响、线路发热等）、环境动态数据（能见度、湿度、风向、温度、烟气浓度等）、交通实时数据（车流密度、车辆类型、行驶速度、人员分布等）及历史数据（过往火灾案例、故障记录、应急处置数据）。采用边缘计算技术实现数据实时采集与初步过滤，通过5G、工业以太网保障数据低延迟传输，同步接入消防、交通部门的协同数据。预处理阶段依次开展清洗（剔除异常值、补全缺失值）、集成（融合多源异构数据）、转换（非结构化数据结构化）与归一化操作，通过数据增强技术扩充样本量，重点强化火灾前兆信号与风险演化数据的关联性，为模型训练提供高质量数据支撑。

2.2 大模型选型与优化适配

结合隧道火灾风险动态预测的时序性、多源性特征，选型需兼顾实时推理能力与复杂特征挖掘能力，优先采用时序大模型（Transformer变体、LSTM改进模型）与多模态融合大模型的组合架构。时序大模型负责捕捉设备运行、烟气扩散等时序数据的变化规律，精准预判风险演化趋势；多模态模型实现数值数据、图像数据（摄像头画面）、文本数据（故障记录）的融合分析，提升风险

识别的全面性。模型优化方面,采用迁移学习方法,基于通用火灾数据集预训练,再用隧道专项数据微调,适配隧道封闭空间的风险特征;通过贝叶斯优化算法调整超参数,引入注意力机制强化火灾前兆信号(如烟气体浓度、设备异常温度)的特征权重;采用轻量化技术精简模型结构,确保预测延迟控制在秒级,满足动态预测的实时性需求^[2]。

2.3 动态预测模型训练与风险量化

模型训练以“风险等级精准量化、演化路径准确推演”为核心目标,遵循科学训练流程。采用分层抽样划分训练集、验证集与测试集,确保样本覆盖火灾不同演化阶段。构建多目标损失函数,以风险预测准确率、等级划分精度、演化路径推演偏差为核心优化指标,通过反向传播算法迭代更新模型参数。针对火灾样本稀缺问题,采用SMOTE技术扩充火灾场景样本,结合正则化技术抑制过拟合。训练后通过混淆矩阵、准确率、召回率等指标验证模型性能,重点优化火灾初期(1-3分钟)的预判精度。基于训练完成的模型,建立风险量化标准,将风险等级划分为低危(隐患可控)、中危(需预警管控)、高危(火势萌芽)、极危(火势蔓延)四级,实现风险等级的实时动态更新,同步输出风险演化曲线与关键节点预判结果。

3 基于风险动态预测的分级应急决策模型构建

3.1 应急决策核心因素动态分析

基于大模型预测的风险动态数据,系统梳理影响应急决策的关键因素,构建层次化因素体系。核心因素包括:动态风险核心信息(大模型预测的风险等级、火势位置、蔓延速度、烟气扩散方向及次生灾害概率);隧道实时态势(车流密度、人员数量及分布、逃生通道畅通情况、设备联动状态);应急资源动态(应急人员、灭火设备、救援车辆、医疗物资的数量、位置及调配能力);环境适配因素(隧道内能见度、风向、温度等对救援作业的影响);外部协同因素(消防、医疗、交通部门的响应速度、联动流程及支援能力)。采用层次分析法明确各因素权重,重点强化风险等级、人员分布、资源状态的动态关联,实时更新因素影响权重,为决策规则制定提供动态依据。

3.2 分级应急决策规则制定

以“风险等级为核心、生命安全为优先”,结合隧道应急管理规范,制定与动态风险等级适配的分级决策规则,确保决策的针对性与时效性。低危等级(隐患可控):启动预警机制,加强设备巡检与数据监测,无需交通管制,做好应急准备;中危等级(需预警管控):发布风险

预警,启动局部交通疏导,调配就近应急资源待命,检修故障设备阻断风险演化;高危等级(火势萌芽):立即触发火灾报警,启动初期灭火设备,规划疏散路线,封闭隧道入口,联动消防部门准备救援;极危等级(火势蔓延):启动全面应急响应,优先组织人员疏散,实施全隧道交通管制,协调消防、医疗、交通部门联动处置,同步采取控火、排烟、结构防护等措施。规则中明确各等级的责任主体、操作流程与时间节点,预留动态调整空间,适配风险演化的不确定性^[3]。

3.3 智能应急决策模型构建

采用“大模型驱动+规则约束+案例推理”的混合架构,构建智能化应急决策模型,实现决策方案的快速生成与动态优化。模型输入层整合大模型输出的动态风险数据、隧道实时态势数据、应急资源数据及外部协同数据;特征融合层通过大模型挖掘数据深层关联,生成综合应急态势评估报告,明确核心处置目标;决策推理层以分级决策规则为约束,检索历史相似火灾案例的处置经验,生成多个候选决策方案;输出层基于多维度评估指标,对候选方案排序,输出最优决策建议。模型嵌入实时反馈机制,将应急处置过程中的动态数据(火势控制效果、疏散进度、资源消耗等)回传至模型,持续修正决策方案,同时保障模型轻量化运行,确保紧急情况下秒级输出决策建议。

3.4 应急决策方案生成与动态评估

决策方案基于模型推理结果与实时风险态势生成,涵盖全流程处置内容,确保可操作性。方案核心模块包括:风险控制措施(针对性灭火策略、通风设备联动排烟、故障设备停机隔离);人员疏散方案(动态调整疏散路线、明确引导责任、划定安全集结点);交通管控方案(入口封闭、车辆分流、应急通道保障、车流疏导流程);资源调配方案(人员、设备、物资的调度路径、优先级与时间节点);外部协同方案(与消防、医疗部门的联动接口、信息共享流程及支援请求机制)。方案评估采用动态多维度指标体系,包括处置效率(火势控制时间、人员疏散时长)、安全性(伤亡风险、次生灾害概率)、可行性(资源匹配度、操作难度)与经济性(损失控制效果)。通过定量与定性结合的方式评估方案优劣,在处置过程中实时追踪实施效果,根据风险演化态势动态修正方案,确保应急处置高效精准。

4 基于大模型的风险防控与应急保障机制

4.1 风险预测与应急决策联动机制

构建一套“预测-预警-决策-处置”的闭环联动机制,是实现风险动态精准防控与应急决策高效衔接的

关键所在。借助大模型强大的数据处理与分析能力，能够实时输出风险等级以及风险的演化数据。这些数据一旦生成，便会自动触发对应等级的预警信号，并启动相应的决策流程，整个过程无需人工干预，极大地缩短了响应时间。同时，将预警系统与应急决策平台深度融合，确保预警信息能够同步且迅速地推送至各个责任主体以及应急队伍，实现信息的及时共享。此外，建立反馈通道至关重要，应急处置过程中产生的数据会实时回传至大模型，大模型依据这些数据不断优化预测精度与决策规则，从而形成“数据-预测-决策-处置-优化”的良性循环。针对可能出现的大模型预测偏差情况，专门设置人工干预接口，保障在极端场景下决策的灵活性。通过这一联动机制，还能实现设备、人员以及外部力量的协同调度，全面提升应急处置的效率。

4.2 应急资源动态优化配置

基于大模型精准预测的风险分布与演化趋势，实现应急资源的动态统筹配置，是提升资源利用效率、增强应急保障能力的有效途径。在人员配置方面，依据风险等级以及具体的处置需求，合理分配具备相应技能的应急人员，组建专项小组以应对复杂多变的风险场景。同时，建立跨部门人员调度机制，打破部门壁垒，确保在紧急情况下能够快速响应^[4]。物资设备配置上，依托智能库存管理系统，结合风险预测结果，科学优化灭火、救援、医疗等物资的储备种类与位置。在隧道沿线合理布局储备点，实现资源的精准调配与及时补给，避免资源浪费与短缺。交通协同方面，根据实时风险状况，动态规划应急救援通道，与交通部门紧密协调，实施分流管控措施，保障救援车辆能够快速通行，避免因交通拥堵导致资源运输受阻，确保应急救援工作进行顺利。

4.3 模型迭代与机制优化

建立大模型与应急机制的持续优化体系，对于提升动态预测与决策的科学性具有重要意义。定期收集隧道运行数据、火灾案例数据以及应急处置数据，将这些丰富多样的数据作为大模型迭代训练的“养料”，不断优化

大模型的特征提取能力与风险推演精度，使其能够更好地适配隧道工况的变化以及设备的更新需求。基于应急处置的实际效果，定期对分级决策规则与联动机制的有效性进行全面评估，根据评估结果修正决策指标权重与操作流程，确保决策的科学性与合理性。结合新技术的发展趋势，积极融入物联网、无人机巡检等产生的数据，丰富数据采集维度，为预测提供更全面的信息支持，提升预测的全面性与准确性。另外，开展应急演练是检验模型与机制可行性的重要手段，通过模拟不同风险场景下的决策处置流程，积累实战经验，不断完善模型与机制，提高应对突发事件的能力。

结束语

大模型凭借强大的实时数据处理与复杂推理能力，为隧道火灾风险动态预测与应急决策提供了智能化解决方案，有效突破了传统模式的静态局限与决策滞后性。本文构建的动态预测模型与分级应急决策模型，实现了火灾风险从隐患预判、等级动态更新到科学处置的全流程管控，联动机制与资源优化配置进一步保障了应急处置的高效性。未来，需持续推进大模型与隧道安全管理的深度融合，优化模型实时性与精度，完善多部门协同机制，应对复杂工况与极端场景下的火灾风险，构建“精准预测、快速决策、高效处置”的隧道安全应急管理体系，全力保障隧道通行安全与人民生命财产安全。

参考文献

- [1]吴珂,周倩,陈茗,等.交通隧道火灾概率的动态量化研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2024,6(2):59-65.
- [2]蔡泽海.高速公路隧道火灾自动预警系统的设计与应用[J].中国科技纵横,2025(17):28-30.
- [3]刘红勇,徐敏,张静晓,等.基于GIS的特长公路隧道火灾风险管理研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(8):114-124.
- [4]吴景泰,侯晓彤.沉管隧道火灾风险评估及预警研究[J].化工管理,2020(32):117-118.