

隧道场景中的智能边缘控制技术应用

郑磊 任光粤 徐丹圃 杨先锐 陈信言 周文斌
贵州黔程慧通科技发展有限公司, 贵州 贵阳 550000

[摘要]随着城市交通系统向智能化、自动化方向发展,隧道场景的安全性与运行效率日益受到关注。文中围绕智能边缘控制技术在隧道中的应用展开研究,分析其在数据实时处理、设备联动控制、安全预警等方面的技术实现路径。通过构建分布式边缘计算架构,有效提升隧道运行环境感知能力与响应速度,降低运维成本。研究表明,边缘控制技术可显著提升隧道系统的智能化水平,为智慧交通基础设施提供技术支撑。

[关键词]边缘计算;隧道控制;智能感知;实时响应;设备联动

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16479

中图分类号: TN911

文献标识码: A

Intelligent Edge Control Technology and Application in Tunnel Scenes

ZHENG Lei, REN Guangyue, XU Danpu, YANG Xianrui, CHEN Xinyan, ZHOU Wenbin
Guizhou Qiancheng Huitong Technology Development Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550000, China

Abstract: With the development of urban transportation systems towards intelligence and automation, the safety and operational efficiency of tunnel scenes are increasingly receiving attention. The article focuses on the application of intelligent edge control technology in tunnels, analyzing its technical implementation path in real-time data processing, equipment linkage control, safety warning, and other aspects. By building a distributed edge computing architecture, the tunnel operation environment awareness and response speed can be effectively improved, and the operation and maintenance costs can be reduced. The research results indicate that edge control technology can significantly improve the intelligence level of tunnel systems and provide technical support for smart transportation infrastructure.

Key words: edge computing; tunnel control; intelligent perception; real time response; equipment linkage

引言

隧道交通作为城市交通网络的重要组成部分,其运行安全与效率直接影响整体交通质量。传统隧道控制系统存在响应滞后、数据处理延迟等问题,难以满足复杂多变的环境需求。智能边缘控制技术凭借其分布式、低时延、高实时性等特点,在隧道自动化控制系统中展现出广泛的应用前景。本文将探讨边缘计算技术在隧道场景下的具体实现与关键优势。

1 智能边缘控制系统架构设计

1.1 边缘节点部署策略

在隧道场景中,边缘节点的部署策略对整个智能控制系统的响应速度、稳定性以及数据处理效率具有决定性作用。由于隧道内部环境封闭、空间狭长,信号传输路径复杂,因此边缘计算单元的布局必须充分结合隧道的长度、断面结构、通风区段划分以及功能区属性等因素进行科学设计。通常采用“分区部署+重点覆盖”相结合的方式,在隧道出入口、通风井、变电室、监控中心、应急通道等关键部位优先设置边缘节点,确保数据就地处理、控制就近执行,最大限度降低控制指令的延迟与丢包率。同时,部署过程中还需综合考虑电源稳定性、防尘散热、设备抗震能力及通信冗余等技术指标,保证节点在高湿、高温、

高噪等环境中长期稳定运行。为提高系统的高可用性和容错能力,建议配置双节点冗余架构或引入热备机制,在主节点发生故障时,备用节点可自动接管控制任务,实现“无缝切换”,有效避免因单点故障引发的系统瘫痪,确保隧道运行始终处于智能可控状态。如图1所示:



图1 隧道场景

1.2 数据采集与预处理机制

智能边缘控制系统在隧道场景中面对着庞杂且高频的数据输入,因此对数据处理效率和处理质量提出了更高要求,必须建立一套高效、稳定的数据采集与预处理机制。隧道内部布设有多种类型传感器设备,包括温湿度传感器、烟雾探测器、CO与NO_x气体浓度传感器、红外探测器、

高速摄像头等,这些设备所采集的数据具有来源多样、采样频率不一致、格式复杂等特点。边缘节点需具备多协议适配和数据融合能力,能够实时完成多源数据的同步采集、时间戳校正与初步分类。在数据预处理阶段,系统需执行一系列智能算法操作,如异常值识别与过滤、信号去噪、格式转换与标准化、缺失数据补全等,以剔除无效信息并提升数据质量,从而保障边缘计算模块后续分析与判断的准确性。同时,为减轻网络压力与云端存储负载,边缘系统还应具备临时缓存与数据压缩功能,将低频或冗余数据进行边缘端压缩存储,仅在设定周期或触发条件下进行上报,从而实现“本地优先、云端支撑”的高效数据管理模式。

1.3 控制中心与边缘节点协同方式

边缘控制系统在隧道智能化运行中并非独立运作,而是与上层控制中心形成高度协同的体系架构。系统整体采用“边缘先行、云端统筹”的协同控制模式:云端控制中心主要负责全局运行策略的制定、关键参数的统一设定以及系统资源的优化调度,而边缘节点则承担前端数据的实时处理、本地事件的快速响应及设备的自主控制任务。为实现这一协同机制,系统需构建低延迟、高可靠的双向通信链路,使边缘节点能够实时接收上级指令,同时将运行状态、故障告警、数据摘要等内容回传至控制中心,实现数据闭环与动态决策调整。为增强系统在突发情况下的稳定运行能力,应设计具备容错能力的分层控制策略,即在网络中断、中心离线等异常条件下,边缘节点可基于本地缓存的策略和模型独立执行控制任务,保障关键功能不中断。此外,系统应集成智能任务调度机制与负载均衡算法,动态分配计算资源与控制优先级,避免因节点压力过大或指令冲突而导致控制失效,确保隧道系统运行的连续性、稳定性与高效性。

2 关键控制技术与智能算法集成

2.1 基于 AI 的环境感知算法

隧道内部环境封闭、通风不畅,且常伴有车流密集、温湿波动、照明条件变化等复杂因素,传统依赖单一传感器或人工监控的感知方式,往往难以及时识别突发事件,导致应急响应滞后。为提升系统的智能化与自动化水平,智能边缘控制系统集成了先进的 AI 环境感知算法。通过在隧道关键区域部署高分辨率摄像头、多模态传感器(包括温湿度、气体浓度、红外、噪声等),系统能够实时采集多源异构数据。利用卷积神经网络(CNN)结合 YOLO、SSD 等目标检测模型,系统可快速准确地识别烟雾蔓延、明火、水体渗漏、车辆聚集、异常停留等关键事件,并分类判断其严重程度。AI 算法具备持续学习与自适应更新能力,可在边缘节点上完成模型微调与场景适配,显著提升在低光、高湿、强干扰等极端环境下的识别准确性。通过“数据采集—智能识别—实时反馈”的闭环机制,实现了对隧道环境的全天候、全要素、全覆盖感知,为后续控制响应提供了坚实的数据基础。

2.2 边缘侧控制逻辑执行引擎

边缘节点在隧道智能系统中不仅需完成实时数据采集与处理,更需承担对复杂控制逻辑的快速执行任务。为实现高效、可靠的现场控制响应,系统配置了嵌入式控制逻辑执行引擎,其核心由规则引擎、推理模块以及联动控制调度器三大功能单元构成。规则引擎基于预设控制策略,可识别多条件触发事件,如“当 CO 浓度超过设定阈值且通风设备处于空闲状态时,自动启动排风系统”,具备逻辑判断、优先级判定与控制指令生成等能力。推理模块则在面对数据缺失或冲突时,利用模糊逻辑与知识图谱进行智能判断,保障系统在非理想状态下仍可维持控制决策的准确性与连续性。联动控制调度器用于多设备协调操作,如在火灾预警状态下联动启动风机、照明、广播与门禁设备,快速响应紧急事件,构建多系统联动的应急响应机制。该执行引擎采用模块化结构设计,便于在不同类型的隧道节点中灵活部署与参数化配置,具备良好的扩展性、通用性及后期运维便捷性,满足复杂场景下的智能控制需求。

2.3 实时响应与预警算法设计

在突发事件的快速处置中,响应速度直接决定了事故控制的效率与损失程度,是衡量边缘控制系统实用性与智能水平的重要指标。为显著提升应急响应能力,系统构建了一套高效的实时响应与智能预警算法体系。该体系基于时间窗策略与事件优先级模型,能够对复杂环境下的多源异常数据进行快速综合判断。例如,在火灾预警方面,系统不仅分析烟雾浓度,还结合温升速率、红外图像变化、视频动态检测等多维度数据,融合形成决策依据,进而按照设定的风险等级,自动启动相应级别的预警流程与联动控制策略。预警算法具备自学习能力,可通过历史数据训练,动态调整报警门限与判定参数,有效降低误报与漏报率。同时,信息发布机制支持多种形式,包括本地声光报警、语音广播、引导指示灯联动,以及通过短信、APP 等方式进行远程提醒,确保各类人员在最短时间内获取准确预警信息。

3 典型应用场景与系统集成实践

3.1 通风与照明智能控制

隧道通风与照明系统是保障行车安全与运行环境舒适度的关键子系统。传统控制模式多采用定时或人工方式,缺乏对实时环境的响应能力。而在智能边缘控制系统中,通风与照明控制实现了高度智能化与自适应调节。边缘节点可实时接收 CO、NO_x 浓度、能见度、光照强度等传感器数据,并结合交通流量分析结果,通过内嵌算法判断是否需要启动通风风机或调整照明亮度。系统支持分区控制,可针对不同路段独立调节,有效降低能耗。例如,当检测到车流量密集但空气质量良好时,系统仅提升局部亮度而不启用通风设备,从而实现节能运行。此外,边缘系统还可根据历史运行数据建立模式库,自动优化照明与通风策略,提高运行效率。

3.2 火灾与有害气体智能预警

隧道空间封闭,一旦发生火灾或有毒气体泄漏,极易造成重大安全事故。因此,火灾与有害气体智能预警是边缘控制技术的重点应用场景。系统部署有烟雾探测器、红外温度传感器、火焰识别摄像头及气体浓度监测装置,并由边缘节点实时采集并融合这些多源数据。通过 AI 模型对比变化趋势和异常指标,系统可在火情初期即做出判断,并根据事件等级自动触发排风、喷淋、语音广播和应急照明等控制流程。对于有毒气体如 CO、NO_x 等的监测,系统设置多级报警阈值,一旦检测浓度超限,将立即联动启动风机加快换气,同时将信息通过图形界面及远程推送向运维中心反馈。该机制具有毫秒级响应能力,极大提高了事故早期响应效率,保障了通行安全。

3.3 车辆与人员流动动态管理

隧道中车辆与人员的流动管理直接关系到交通秩序与施工安全。边缘控制系统通过部署智能视频监控设备、RFID 读卡器及红外传感器等,实现对车辆通行状态、车速、停车行为以及作业人员位置的实时感知与动态跟踪。系统可对车辆异常停留、倒车、超速等行为进行自动识别,并根据行为类型自动发出声光警示或远程通知管理中心。同时,系统支持车流统计与预测,可为交通调度提供决策支持。在施工场景中,通过佩戴定位标签或智能头盔的方式,系统可实现人员轨迹监控与作业区域划定,一旦发现人员进入禁区或长时间停留在高风险区域,系统将立即发出预警。通过边缘算法快速处理前端图像与位置信息,避免因延迟导致的隐患扩大,显著增强隧道安全管理能力。

4 系统运行效果分析与未来优化方向

4.1 实际运行效率评估指标

为全面评估智能边缘控制系统在隧道场景中的应用成效,需从响应时间、控制准确率、预警成功率、能耗降低比例等多个维度进行量化分析。通过对某城市地下隧道项目进行为期三个月的监测,如表 1 所示:

表 1 关键运行指标数据

指标名称	传统系统平均值	边缘系统运行值	提升幅度
平均事件响应时间	3.2 秒	0.8 秒	缩短 75%
控制命令执行成功率	92.3%	98.7%	提升 6.4%
异常预警识别准确率	85.5%	96.2%	提升 10.7%
照明与通风能耗降低率	—	19.4%	能耗显著下降

数据表明,边缘控制系统在事件响应速度、智能控制准确性及预警识别能力方面均显著优于传统集中式控制系统,尤其在多点设备协同响应场景下优势更为明显。同时,通过智能调节策略,系统实现了能源成本的有效控制。

4.2 典型故障场景下系统表现

在隧道实际运行中,系统可能面临断网、节点失效、

电力波动等突发故障场景。为验证边缘系统的鲁棒性与独立控制能力,测试模拟了“边缘节点失去与云端连接”及“本地传感器单点失效”两类典型异常。结果显示,边缘系统依托本地存储的策略库与容错机制,能在通信中断时自主完成风机控制、照明调节与预警广播任务,控制精度未出现明显下降。此外,系统设有健康监测与自诊断模块,能在节点或设备发生异常时主动上报错误并切换至备用逻辑路径,保障控制链不中断。相比传统系统对中心控制的强依赖,边缘系统展现出更强的稳定性与自愈能力,适应复杂环境能力更强。

4.3 技术发展趋势与系统优化方向

随着 AIoT、5G 及新型传感技术的持续进步,边缘控制系统正朝着更高性能、更强感知、更精细控制方向演进。未来系统可进一步集成 5G 高速通信,实现边缘-云-端之间毫秒级同步,为多隧道协同控制提供网络基础。同时, AI 算法将从静态模型转向在线训练模式,使系统能根据现场情况动态调整控制策略,提升系统智能等级。软硬件架构方面,边缘设备将趋于模块化与标准化,便于快速部署与维护。此外,未来系统将引入数字孪生技术,构建虚拟隧道运行模型,结合仿真与实际数据联动,实现“预测控制”和“智能决策”的闭环控制体系。通过这些优化路径,边缘控制将在智慧交通、应急响应、低碳运行等方面发挥更大作用。

5 结束语

智能边缘控制技术在隧道场景中的应用,有效解决了传统控制模式中存在的延迟高、集中负载大等问题。通过分布式处理和智能响应机制,提升了隧道运行的安全性与智能化水平。未来,随着 AI、5G、物联网等技术的进一步发展,边缘控制系统将具备更强的数据处理能力与自适应控制能力,为城市智慧交通建设提供有力支持。

[参考文献]

- [1] 郭浩鑫. 智能网联单轨捷运系统编组协同运行智能控制研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.
- [2] 马英博. 基于图像信息的盾构隧道表面病害自动检测系统研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
- [3] 陈再励. 基于人体表征与场景理解的隧道施工风险识别评估与管控方法研究[D]. 北京:中国地质大学,2022.
- [4] 陈庆国. 基于数字图像处理技术的隧道交通智能视频监控[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [5] 李佳玉,江若飞,王荣波,等. 基于知识图谱的隧道智能施工系统构建研究[J]. 铁道技术标准(中英文),2024,6(8):23-31.

作者简介:郑磊(1988.3—),男,学士学位,中级工程师,目前就职于贵州黔程慧通科技发展有限公司,主要从事公路机电、交通信息化、大数据、建筑智能化方向的工作。