

面向高韧性与自进化的城轨ATO系统云边端协同架构研究

柴荣阳

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 063700

摘要: 针对传统城轨ATO系统韧性不足、无自进化能力、协同效率低等痛点,本文结合云边端协同计算、联邦学习、韧性系统等技术,设计面向高韧性与自进化的ATO云边端协同架构,提出对应的韧性控制、自进化及资源调度策略,明确各层级功能与协同逻辑,通过多维度可行性分析验证方案合理性,有效解决局部故障扩散等问题,为列车智能控车提供可靠支撑,提升城轨运营的安全性、高效性与稳定性。

关键词: 云边端协同;韧性;自进化

引言: 随着城轨交通向高密度、高可靠、智能化方向发展,传统ATO系统集中式架构已难以满足复杂工况下的控制需求,局部故障易扩散、控制策略无法自适应工况变化等问题凸显。车地协同作为列车智能控车的核心支撑,结合云边端协同、联邦学习等新技术,可实现全局统筹与本地控制的有机结合,本文聚焦相关策略,围绕韧性保障与自进化能力构建方案,破解现有系统短板。

1 相关理论与技术基础

1.1 城轨ATO系统核心理论

(1) ATO系统基本组成与工作原理:核心由车载控制器、地面设备、通信链路构成,车载控制器负责实时接收指令并控制列车运行,地面设备实现线路状态监测与指令下发,通信链路保障两者间数据高速传输,三者协同完成列车自动驾驶、精准停车等核心功能。(2) ATO系统控制需求:安全性为首要需求,需规避各类运行风险;实时性要求指令传输与响应无延迟;舒适性聚焦乘客体验,控制加减速平稳性;高效性旨在提升线路运输效率;同时需具备快速故障识别与应急处置能力,保障系统稳定运行。(3) 传统ATO系统控制架构局限性:多为集中式或分布式固定架构,缺乏韧性,面对设备故障、突发干扰时恢复能力弱,且无自进化能力,无法自适应线路工况变化与长期运行损耗。

1.2 云边端协同计算技术

(1) 云计算技术:具备全局优化、大规模模型训练及大数据分析能力,可整合全线路ATO系统数据,实现整体运行策略优化,适配城轨多线路、多站点协同管控的需求。(2) 边缘计算技术:核心优势在于区域协调、低时延数据处理与本地决策,可就近处理车载及站点实时数据,降低传输延迟,与ATO系统实时控制需求高度契合,提升局部运行稳定性。(3) 云边端协同机制:通过明确数据交互标准、合理规划任务卸载策略、动态

调度云边端资源,实现全局决策与本地控制的协同,为ATO系统高效运行提供支撑^[1]。

1.3 韧性系统理论

(1) 韧性系统核心定义与特征:指系统面对扰动时,具备吸收干扰、抵抗破坏、快速恢复的三大核心能力,可维持系统核心功能稳定。(2) 韧性评估指标体系:包含拓扑型、特征型、性能型三类指标,适配城轨ATO系统,可从系统结构、运行特征、控制性能三个维度评估其韧性水平。(3) 韧性系统工业应用:已在各类工业控制领域落地,其抗干扰、自恢复设计思路,为城轨ATO系统韧性架构设计提供重要理论参考。

1.4 联邦学习与自进化技术

(1) 联邦学习技术:具备分布式训练、数据隐私保护优势,无需汇集各站点敏感数据即可完成模型训练,适配城轨多节点数据共享与隐私保护需求。(2) 自进化技术核心:通过在线学习实时捕捉工况变化,结合策略迭代与自适应优化,实现系统控制策略的动态调整,提升适配能力。(3) 融合应用:联邦学习为自进化提供数据支撑与训练框架,自进化技术实现控制策略迭代升级,二者融合为ATO系统自进化能力提供核心技术支撑。

2 面向高韧性与自进化的城轨ATO云边端协同架构设计

2.1 架构设计目标与原则

(1) 设计目标:针对传统ATO系统集中式架构韧性不足、故障易扩散、无自进化能力等痛点,构建云边端协同架构,实现局部故障隔离,保障单一节点或区域故障不影响全线运行;具备在线自进化能力,可根据线路工况、客流变化动态优化控制策略,兼顾系统安全性与运输高效性,满足城轨高密度、高可靠运营需求。(2) 设计原则:坚持韧性优先,将故障抵抗、快速恢复能力贯穿设计全程;遵循协同高效,优化云边端资源配置与任务分工;

注重自进化适配,支撑控制策略在线迭代;兼顾可扩展性,预留接口便于后续升级与线路拓展;立足工程可实现性,结合现有设备基础降低部署难度与成本。(3)架构整体定位:区别于单一云端集中控制高时延、单一边缘计算全局协同不足的问题,突出云边端协同、韧性保障与自进化能力深度融合的核心优势,打造“全局统筹、区域自主、故障自愈、持续优化”的新型ATO系统架构,适配现代城轨智能化、高可靠发展需求。

2.2 架构整体框架设计

(1)云端层设计:承担全局优化、模型训练、数据存储三大核心功能,采用分布式云架构,整合全线路列车运行与线路状态数据,实现全线运行策略全局优化;搭建联邦学习模型训练平台,完成控制模型的离线训练与在线更新;构建高可靠数据存储系统,实现数据备份与高效调取,为全局决策提供支撑。(2)边缘层设计:按线路分区部署区域协调节点、局部故障处理节点、低时延决策节点,区域协调节点统筹本区域列车协同运行;局部故障处理节点实时监测设备状态,快速识别故障并启动应急处置;低时延决策节点就近处理车载与站点实时数据,实现毫秒级本地决策,降低传输时延^[2]。

(3)终端层设计:优化车载控制器结构,增设自主决策模块,确保边缘节点故障时可临时独立控制列车;升级数据采集模块,拓宽采集维度、提升精度,实时捕捉列车运行与线路环境数据;完善执行反馈模块,实现控制指令精准执行与运行状态实时反馈,形成闭环控制。

(4)云边端交互层设计:采用高可靠、低时延通信协议,保障数据传输稳定实时;设计分级数据传输机制,区分关键指令与非关键数据的传输优先级;优化任务调度流程,根据任务复杂度与实时需求动态分配云边端任务,确保协同运行高效有序。

2.3 架构核心模块详细设计

(1)韧性保障模块:整合故障检测、冗余备份、快速恢复、抵抗攻击四大子模块,通过多维度监测实现故障精准识别与定位,采用双重冗余备份设计避免单点故障,建立故障快速恢复机制,实现局部故障隔离与系统快速自愈;增加抵抗攻击防护设计,保障系统数据与指令传输安全,确保全线运行稳定。(2)自进化模块:基于联邦学习技术搭建模型在线训练模块,无需汇集各区域敏感数据即可完成全局模型迭代;设计控制策略迭代优化机制,结合实时运行数据动态调整控制参数;构建自适应调整模块,可根据客流变化、线路损耗等工况,自动适配最优控制策略,实现系统自进化。(3)协同控制模块:明确云端、边缘层、终端层的协同逻辑,云

端下发全局优化指令,边缘层根据区域工况进行局部调整,终端层执行控制指令并反馈运行状态;建立协同调度机制,实现全局决策与局部控制的有机结合,兼顾全线高效运行与区域灵活适配^[3]。

2.4 架构可行性分析

(1)技术可行性:云边端协同计算、联邦学习、故障检测等技术已在工业控制、轨道交通等领域成熟应用,具备较高的技术成熟度;相关技术可根据城轨ATO系统需求进行适配优化,能够满足系统韧性与自进化的核心技术要求,技术实现路径清晰。(2)工程可行性:架构设计充分考虑现有城轨ATO系统的硬件基础,可与现有车载、地面设备兼容,降低硬件更换成本;部署方案贴合工程实际,分区域、分阶段实施,施工难度可控,无需大规模改造现有线路设施,具备较强的工程可实现性。(3)性能可行性:通过韧性保障模块可实现局部故障不扩散,系统恢复时间大幅缩短;自进化模块可使控制策略持续优化,提升运行效率与舒适性;经模拟测试,架构可满足城轨ATO系统的安全性、实时性、高效性需求,预期性能达到设计目标,具备良好的性能可行性。

3 基于云边端协同的ATO韧性控制与自进化策略实现

3.1 云边端协同韧性控制策略

(1)局部故障应对策略:依托边缘层区域化部署优势,构建分布式故障隔离机制,当单个车站ATS失效等局部故障发生时,边缘层局部故障处理节点立即启动独立控制模式,接管该区域列车调度与控制权限,实现故障区域与全线系统的物理隔离、逻辑隔离,确保局部故障不扩散、不影响全线列车正常运行,同时云端层同步监测故障状态,指导故障排查与恢复。(2)网络攻击防御策略:构建云端全局监测、边缘层异常拦截、终端层安全校验的三级防御体系。云端实时监测全线路数据传输与系统运行状态,识别异常攻击行为;边缘层部署入侵检测节点,对非法数据与异常指令进行拦截过滤;终端层对接收的控制指令进行多重安全校验,验证指令合法性与完整性,全方位保障系统网络安全^[4]。(3)突发大客流适配策略:采用云边端协同调度模式,云端结合全线路客流数据进行全局运力统筹,动态调整列车发车间隔;边缘层实时采集本站及相邻站点客流数据,优化列车停站时间与进出站速度;终端层根据指令精准执行控制操作,通过运力调度、速度调整、停站优化的协同配合,提升系统抗扰动能力,避免客流拥堵引发的运行紊乱。

3.2 基于联邦学习的自进化控制策略

(1) 联邦学习训练机制: 采用终端层局部训练、边缘层聚合、云端全局优化的分布式训练流程。终端层车载控制器与站点设备基于本地运行数据完成局部模型训练, 不泄露敏感数据; 边缘层对本区域内各终端局部模型进行聚合, 生成区域模型; 云端层汇总各边缘区域模型, 进行全局优化迭代, 形成最优控制模型并下发至边缘层与终端层, 实现模型协同更新。(2) 控制策略自进化迭代: 依托云边端协同数据采集能力, 实时捕捉列车运行状态、线路工况、客流变化等数据, 通过在线学习算法分析数据特征, 动态调整控制参数与决策逻辑。针对不同线路坡度、客流密度、设备损耗等场景, 实现加速、减速、停车精度等控制策略的自适应优化, 持续提升系统运行效率与舒适性。(3) 自进化收敛性保障: 设计科学的迭代终止条件, 当控制策略的优化精度达到预设阈值、运行性能趋于稳定时, 终止迭代过程, 避免过度迭代导致系统波动; 制定合理的参数调整规则, 限定参数调整范围与步长, 确保策略进化过程平稳, 同时建立迭代反馈机制, 及时修正进化偏差, 保障策略进化的稳定性与有效性。

3.3 云边端任务协同与资源调度策略

(1) 任务划分原则: 根据任务实时性要求与计算复杂度, 进行云边端任务合理分配。高实时性、低复杂度的控制决策任务交由边缘层与终端层承担, 确保毫秒级响应; 高复杂度、全局统筹类任务, 如模型训练、全局运力优化等, 交由云端层处理, 充分发挥各层级计算优势, 提升任务处理效率。(2) 资源调度算法: 采用基于多目标优化的资源分配策略, 以时延、能耗、控制精度为核心优化指标, 动态分配云端、边缘层、终端层的计算资源、存储资源与通信资源。通过算法实时调整资源分配比例, 在保障控制实时性与精度的前提下, 降低系统能耗, 实现资源高效利用。(3) 数据交互优化: 采用轻量化数据传输协议, 对传输数据进行压缩处理, 减少数据传输量; 区分关键控制指令与非关键监测数据的传输优先级, 优先保障关键指令高速传输; 优化数据交互时序, 避免数据拥堵, 进一步降低云边端数据交互时延, 确保控制指令及时下发与运行状态实时反馈^[5]。

3.4 策略实现流程与关键技术突破

(1) 整体实现流程: 设计从数据采集、模型训练、策略下发到执行反馈的闭环实现流程。终端层实时采集列车运行与线路状态数据, 上传至边缘层与云端; 云端与边缘层基于联邦学习完成模型训练与策略优化; 云端下发全局策略, 边缘层结合区域工况调整后下发至终端层; 终端层执行控制策略, 并将运行反馈数据回传, 形成闭环迭代, 持续优化策略性能。(2) 关键技术突破: 重点突破三大核心技术, 一是韧性与自进化的协同优化技术, 实现故障应对与策略进化的有机结合, 避免两者冲突; 二是联邦学习在ATO系统的适配技术, 优化训练流程与模型结构, 适配城轨多节点、高实时性的运行需求; 三是低时延协同控制技术, 通过协议优化与资源调度, 进一步降低云边端协同时延, 保障控制指令精准、快速执行。

结束语

本文围绕车地协同列车智能控车策略展开研究, 构建了云边端协同的ATO系统架构, 提出并实现了韧性控制、自进化及任务协同策略, 通过多维度可行性分析验证了方案的实用性与有效性, 有效弥补了传统系统的局限性。研究虽取得一定成果, 但在复杂电磁环境适配、多线路互联互通等方面仍有提升空间, 后续将结合实际运营数据优化策略, 推动车地协同智能控车技术在城轨领域的深度落地与迭代升级。

参考文献

- [1] 彭永成. 车地协同列控系统追踪运行模块HCPN建模与验证[J]. 兰州交通大学学报. 2023, 42(5): 76-79.
- [2] 黄璞, 张琨, 杜庆. 城市轨道交通列车自动控制停站舒适度研究[J]. 城市轨道交通研究. 2023, 26(6): 104-107.
- [3] 张文韬, 卢剑鸿, 姜彦璘. 智慧城轨发展现状分析及建议[J]. 现代城市轨道交通. 2022, 13(1): 92-95.
- [4] 彭湃, 赵振杰, 李凯, 等. 基于主动感知的列车自主运行系统控制方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术. 2025, 22(1): 236-239.
- [5] 赵文强. 中断条件下高铁列车运行调整优化模型与算法研究[J]. 铁道科学与工程学报. 2025, 22(3): 96-98.