



一种兼容不同制式的OC设备研究

刘 肖

(合肥市轨道交通集团有限公司, 安徽 合肥 230022)

摘 要: 为解决城市轨道交通既有线路升级改造与新线路分期开通引发的系统兼容性难题, 文章提出一种支持多制式协同运行的对象控制器(OC)。通过深入剖析列车自主运行系统(TACS)与基于通信的列车控制系统(CBTC)在资源管理范式与通信协议上的核心差异, 文章设计一种基于统一通信协议与动态资源调度策略的OC设备架构。相较于传统TACS系统中的OC设备, 该架构可根据不同列车控制系统的控制模式灵活重构, 有效满足列车智能调度、安全防护及降级运行管理等多元化需求。试验结果表明, 该OC设备在TACS系统下的资源利用效率提升了55.6%, 在CBTC系统环境中也展现出优异的兼容性与可靠性。该方案显著降低了系统间接口复杂度, 有助于缩短工程实施与调试周期, 为轨道交通新旧线路混合运营场景下的安全、高效运营提供了有力的技术支撑。

关键词: 城市轨道交通; 对象控制器; 多制式兼容; 列车自主运行; 资源动态管理; 仿真

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)04-0137-08

0 引言

随着我国城市轨道交通网络化运营规模的持续扩大, 既有线路的系统升级与新线路的分期建设已成为常态。在此背景下, 基于通信的列车自动控制系统(communication based train control system, CBTC)与基于车-车通信的列车自主运行系统(train autonomous circumambulate system, TACS)等不同列车控制系统之间的异构兼容性问题日益凸显, 导致混合运营场景面临系统接口复杂、资源利用效率低下、调试周期长等严峻挑战, 严重制约了运营效率与安全水平的进一步提升^[1]。

传统CBTC系统主要依赖于车-地-车集中控制架构, 存在轨旁设备冗余度高、通信时延显著、资源管理策略僵化等固有局限^[2]。近年来, TACS系统通过引入车-车直接通信(vehicle-to-vehicle, V2V)与车载自主控制技术, 将部分轨旁核心功能迁移至列车端, 在简化了系统架构的同时, 提升了资源动态分配与运行调整的敏捷性^[3-4]。然而, 现有研究多聚焦于单一制式系统的性能优化, 针对多制式协同控制与资源动态适

配机制的系统性探索仍较为欠缺, 面向新旧线路混合运营的兼容性解决方案亟待突破^[5]。

在技术实现层面, 多制式兼容的核心挑战在于异构系统间的协议差异与资源管理冲突。例如, CBTC系统依赖于计算机联锁(computer interlocking, CI)与区域控制器(zone controller, ZC)的集中式资源分配机制, 而TACS系统则通过对象控制器(object controller, OC)实现分布式资源动态抢占^[6]。在全自动运行场景下, 还需深度融合车辆控制与站台门、牵引供电等子系统, 构建完整的闭环无人驾驶控制逻辑^[7]。尽管现有研究在单一制式优化方面取得了显著进展, 例如文献[8]提出了基于车-车通信的CBTC协议改进方案, 文献[9]设计了面向V2V通信的OC, 但跨制式的协议无缝转换与资源状态一致性映射机制仍缺乏系统性设计。此外, 列车降级场景下的多模式协同安全防护策略尚未形成统一技术框架, 导致系统故障恢复效率受限^[10]。

针对上述问题, 本文提出一种兼容TACS与CBTC系统的创新型OC设备架构, 通过分层设计与智能决策机制, 实现跨制式资源的动态管理与协同调度。本文的主要工作如下:

通信作者: 刘 肖, 女, 高级工程师, 主要从事电力电子、电气牵引传动、轨道交通车辆方面的研究; E-mail: 511229689@qq.com

引用格式: 刘肖. 一种兼容不同制式的OC设备研究[J]. 机车电传动, 2025(4): 137-144. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.017.

Citation: LIU Xiao. Study of a multi-system compatible object controller[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 137-144. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.017.

①设计基于统一通信协议的多模式数据封装与转换机制,突破传统“烟囱式”通信架构的限制。

②构建动态资源状态映射表与冲突消解决策模型,支持TACS动态抢占模式与CBTC固定进路模式的无缝兼容。

③集成多传感器融合的安全防护算法,实现降级场景下的快速故障恢复与运行安全隔离。

1 不同控制系统差异分析

目前,多数城市轨道交通线路广泛采用技术成熟度较高的CBTC系统。该系统运用列车自主定位技术,通过车-地无线通信网络实现地面控制设备与车载控制器(vehicle on-board controller,VOBC)的实时数据交互,为列车提供连续的自动防护与控制服务。但传统车-地-车的体系架构存在明显缺陷:车地接口繁多且复杂,导致项目实施周期延长、调试流程繁琐,且系统局部故障易造成大范围的影响。此外,传统CBTC系统通常依据固定进路对进路内道岔、轨道区段等资源进行集中式管控,导致线路资源的利用效率偏低,系统灵活性不足。

TACS系统是在成熟的CBTC技术基础上,通过架构简化与功能重构形成,主要由中心设备、地面控制设备、网络传输设备及车载设备等构成,系统总体架构示意如图1所示。在TACS系统中,VOBC扮演着核心角色,负责列车的自主运行控制;通过采用LTE-M通信技术,VOBC可与相邻列车VOBC及列车运行自动监控系统(ATS)实现高效数据交互,骨干数据通信有线系统即分布式控制系统(distributed control system,DCS)实现信号系统内部各子系统间的数据流的透明双向传输,从而完成列车自主运行调整、自主间隔计算与安全防护等关键功能;同时,TACS系统引入OC实现列车与轨旁设

备的信息交互,有效精简轨旁设备数量,缩短数据交互周期,降低系统复杂度。在TACS系统中,列车无须通过ZC获取移动授权,VOBC可自主规划列车运行路径,并精确计算移动授权终点。

2 功能需求分析

为确保OC设备有效兼容不同控制系统的技术特点,本章从资源管理、列车调度与列车降级管理3个维度进行功能需求分析。

2.1 资源管理

在传统CBTC系统中,资源管理依赖地面设备对道岔、区段等资源点的集中式管控。该方式虽能保证资源分配的稳定性,但受限于复杂的车地接口与集中式管理结构,资源利用效率普遍较低。相比之下,TACS系统通过简化设备架构,依托VOBC与OC设备的协同运作,使列车可自主规划运行路径并动态调整移动授权,显著提升了资源利用的灵活性与效率。因此,兼容多制式的OC设备需具备灵活可重构的资源管理功能,在不同控制模式下实现资源的智能调度与动态调整,以最大限度提升系统整体资源利用率,并有效缩短工程施工与调试周期。

2.2 列车调度

在CBTC系统中,列车调度通常依赖车-地数据交换,通过地面控制设备与车载设备的协同配合下达与执行调度指令。然而,复杂的车地接口及异构通信协议易引入干扰,造成调度延迟。为实现不同系统的无缝兼容,OC设备需具备智能调度能力,既能根据不同列车控制系统的要求与实时运行状态,自主优化列车的运行间隔、速度曲线及路径规划,又能同时兼容TACS系统的车-车直接通信与CBTC系统的车-地通信模式,确保混合运营场景下多列车的调度协调与运行安全。

2.3 列车降级管理

在传统CBTC系统中,若列车与轨旁控制设备的通信故障导致系统降级,则列车将通过接收有源应答器报文获取点式移动授权信息,在有效的移动授权(movement authority,MA)范围内继续安全运行;若车载VOBC的应答器接收装置或应答器本身发生故障,则需联锁设备人工设定进路,司机以地面信号机显示信号为行车凭证,切换至人工驾驶模式控制列车运行。

相较于传统系统,TACS系统并未在轨旁线路部署信号机及有源应答器等设备,因此不采用传统的点式控制模式与联锁控制模式作为后备方案。在TACS系统下,若列车发生车-地通信故障,则OC设备将为故障列车构建并动态延伸具有安全长度的防护区域,将信

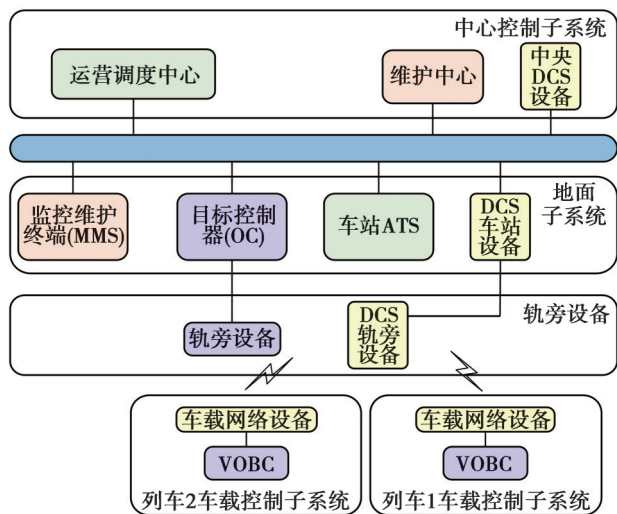


图1 TACS系统总体架构

Fig. 1 Overall architecture of the TACS system

息发送至管辖范围内所有受控列车。处于正常通信状态的列车，车载VOBC接收防护区域信息后会将其视为不可跨越的虚拟障碍物，从而保障故障场景下的运行安全。

根据以上分析可知，兼容多制式的OC设备需具有强大的列车降级管理功能，在列车发生通信或设备故障时，能快速、准确地进行降级处理与安全隔离，确保列车运行安全，并支持系统尽快恢复正常状态。

3 面向多制式兼容的OC设备架构设计

本文提出的OC设备架构以统一通信协议与资源管理策略为核心，旨在实现多种列车控制系统的无缝兼容。该架构包含设备驱动采集层、应用逻辑处理层与数据通信层，系统架构如图2所示。

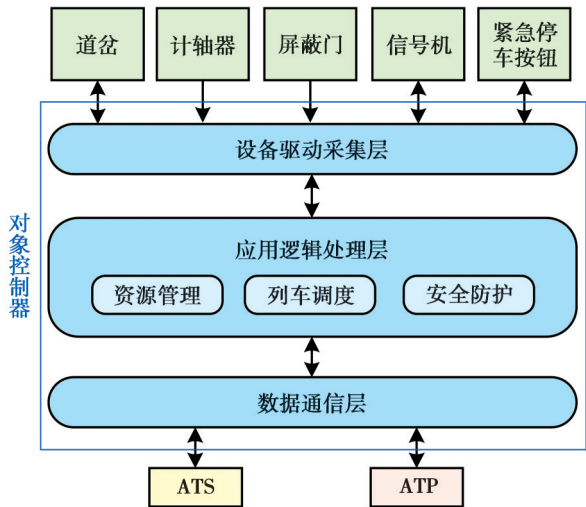


图2 基于统一通信协议和资源管理策略OC设备架构
Fig. 2 OC architecture based on a unified communication protocol and resource management policy

3.1 设备驱动采集层

设备驱动采集层负责与线路设备交互，采集实时

数据并驱动设备执行相应动作，是保障系统通信效率与数据准确性的基础。该层通过统一通信协议实现数据格式与接口标准化，确保所有子系统间数据的一致性，同时采用动态适配机制，实现不同设备间协议的灵活转换。其工作机理如下：

①设计通用硬件接口与模块化适配器架构，支持多种协议的输入与输出，可根据实际运行需求动态加载不同协议驱动模块。

②利用动态协议转换器自动识别输入数据的协议类型并应用相应的转换规则，确保数据传输的准确性与完整性。

③引入基于IEEE 1588的全局时钟同步系统，保证跨设备、跨区域的数据具有统一的时间基准；通过高精度时间戳与数据缓冲区机制有效减少传输与处理延迟，确保数据处理的实时性。

上述机制共同保障了设备驱动采集层的高效运作与无缝集成。例如，控制系统从CBTC向TACS动态切换时，OC设备可逐步减少对ZC的依赖，同步激活车-车通信模块，确保列车在切换过渡期仍能通过双通信通道（车-地+车-车）获取控制指令。

3.2 应用逻辑处理层

应用逻辑处理层负责对采集数据进行综合处理与智能决策，核心功能模块包括资源管理、列车调度与安全防护，实现基于统一资源管理策略的智能调度与运行优化。其中，资源管理模块内置多模式资源策略库。在TACS模式下，该模块将道岔、区段等视为独立资源点，支持车载VOBC的动态申请与释放；在CBTC模式下模拟传统ZC功能，按联锁指令锁闭固定的进路区段资源；模式切换时，OC设备对资源状态（如占用、空闲、锁闭）进行快照，通过状态映射（如表1所示）将其转换为目标系统可兼容的格式。例如，当TACS模式下某道岔资源点标记为“占用”时，在CBTC模式下将对应锁定包含该道岔的整个进路区段。

表1 多模式资源状态映射

Table 1 Multi-mode resource state mapping

TACS 模式状态	CBTC 模式对应状态	转换规则
资源点占用 (动态)	进路区段锁闭	TACS 资源点映射为 CBTC 进路的最小锁闭单元
资源点空闲	进路区段解锁	空闲资源点直接释放，CBTC 需联锁确认
资源点故障 (通信中断)	进路区段占用+联锁报警	OC 标记故障资源点，CBTC 强制锁闭关联进路
动态防护区激活	虚拟区段占用+限速指令	TACS 防护区映射为 CBTC 虚拟限速区段

列车调度模块通过数据分发服务（data distribution service，DDS）等统一通信中间件，将TACS的车-车指令与CBTC的车-地报文转换为标准化数据帧，转换流程如图3所示。该模块将TACS的移动授权封装为

JSON-LD（关联数据）格式，确保其语义与CBTC的MA计算逻辑相兼容。数据转换完成后，通过冲突决策矩阵定义不同模式控制指令的优先级：TACS车-车指令优先级高于CBTC联锁指令。基于此策略，当TACS

列车与CBTC列车竞争同一道岔资源时, OC设备将优先响应TACS列车的动态抢占请求, 同时暂停对CBTC

列车的进路分配, 并通过ATS系统动态调整后续列车的运行计划。

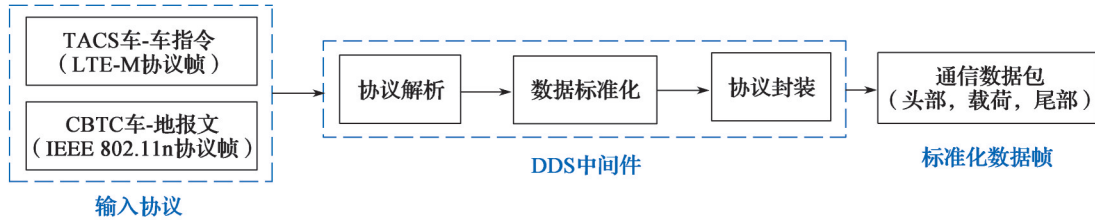


图3 基于DDS中间件的多制式数据帧转换流程(输出数据)

Fig. 3 Multi-system data frame conversion process based on DDS middleware

安全防护模块通过集成多系统数据, 采用动态防护策略计算列车安全间隔 L 。计算综合考量列车的绝对制动距离、相对运行速度、实时线路条件及系统响应延迟等因素, 从而动态调整防护终点, 实现正常运营模式下的多列车协同安全防护, 其计算公式为

$$L = \sum_{i=1}^n \left(v_i \cdot t_{\text{sys}} + \frac{v_i^2}{2a_{i,\text{max}} \cdot k} \right) + \Delta s \quad (1)$$

式中: v_i 为第 i 列车的实时速度; $a_{i,\text{max}}$ 为第 i 列车的最大制动减速度, 其取值与梯度修正系数 k 相关(上坡 $k=0.8$, 平坡 $k=1.0$, 下坡 $k=1.2$); t_{sys} 为系统总响应时间, 包含通信延迟与车载决策时间; Δs 为用于补偿定位误差与突发干扰的安全冗余距离。

在降级模式下, 若发生通信中断, 则OC设备将切换至多传感器融合防护模式(将雷达、视觉识别、应答器数据融合), 通过加权融合算法计算故障列车位置及安全余量 D_{res} , 具体计算方法为

$$D_{\text{res}} = \sum_{j=1}^3 (w_j \cdot x_j) + V_{\text{fault}} \cdot t_{\text{re}} + 3\sigma_{\text{max}} \quad (2)$$

式中: x_j 为不同传感器的定位结果($j=1, 2, 3$, 分别对应雷达、视觉识别及应答器的数据); w_j 为各传感器的权重系数; σ_{max} 为最大定位误差, 用于动态优化定位精度; V_{fault} 为故障列车实时速度, t_{re} 为预期恢复时间, 二者用于量化降级期间列车可能的移动距离。

OC设备根据式(1)和式(2)的计算结果, 动态生成覆盖故障列车前后 $L + D_{\text{res}}$ 范围内的虚拟防护区, 并将防护区边界信息发送至相邻列车, 强制其MA终点回撤至安全边界, 最后通过车载人机界面(human machine interaction, HMI)推送降级路径信息, 提示司机执行限速运行。

3.3 数据通信层

数据通信层作为系统信息交互的核心枢纽, 通过构建统一通信协议框架与智能协议转换机制, 实现TACS与CBTC两个异构系统的无缝兼容, 有效突破传统列控系统“烟囱式”通信架构的局限, 其关键技术实现如下:

①基于DDS数据分发服务中间件构建标准化数据

总线, 采用分层封装技术解决多系统数据异构性问题。将TACS基于LTE-M协议的车-车通信数据与CBTC基于IEEE 802.11n协议的车-地交互报文统一封装为JSON-LD格式, 并通过语义化标签标识数据类型(如“ma_type”: “TACS”)。

②引入IEEE 1588精确时钟同步协议, 实现跨系统微秒级时间同步(误差小于1 ms), 有效避免时钟偏移导致的控制指令时序冲突。例如, TACS列车的移动授权与CBTC联锁指令通过统一时间戳进行全局排序, 确保系统资源分配的时序正确性。

③通信层内置自适应协议转换器, 支持多模式通信协议的实时识别与动态转换。首先, 预置TACS与CBTC系统的协议特征码(如TACS的LTE-M帧头标识为0xA5CB), 通过滑动窗口算法实时解析数据流, 自动识别当前通信协议类型; 其次, 采用动态加载技术, 根据识别出的协议类型激活对应的协议转换模块; 最后, 采用主通道为LTE-M、备用通道为光纤的双通道冗余通信机制, 确保协议转换过程中数据的高可靠传输。

4 系统功能实现

4.1 多资源管理

OC设备通过分层资源管理机制, 实现对TACS及CBTC等多制式系统下道岔、区段、信号机等线路资源的统一建模与智能管控。控制中心ATS系统基于运行图向车载VOBC发送预定的运行路径信息, 车载VOBC根据接收到的路径信息识别列车前方可配置范围内的线路资源点, 并依次向OC设备发起资源申请。OC系统依据多制式资源协同分配规则(如表2所示)进行资源调度。当多制式列车竞争同一资源时, 启动冲突决策机制: TACS的动态资源请求优先级高于CBTC的固定进路申请, OC将暂停CBTC的资源分配流程, 通过ATS动态调整后续列车的运行计划, 并记录冲突事件用于优化资源分配阈值。在资源释放环节, 车载VOBC使用完毕后主动向OC发送释放请求, OC设备即时回收资源并重新分配给后续申请列车。

表2 多制式资源协同分配规则

Table 2 Patterns of multi-system resource collaborative allocation

资源类型	TACS模式管理策略	CBTC模式兼容策略	冲突解决动作
道岔	动态抢占	映射为固定进路锁闭	暂停CBTC分配, 触发ATS调整
区段	独立资源点	合并为联锁区段	优先释放空闲区段资源
信号机	虚拟化	映射为传统信号逻辑	关闭冲突信号机, 启用冗余路径

4.2 多模式调度协同

兼容多制式的OC设备通过动态协议适配与分层控制逻辑, 在不同列控模式下实现差异化调度协同。在TACS模式下, 车载VOBC基于OC设备动态授权的资源点, 通过LTE-M网络实时交换相邻列车的位置与速度信息, 自主计算最优运行间隔与路径规划。例如, 在高峰运营时段, VOBC可通过动态抢占机制缩短关键资源的占用时间, 同时基于实时交通状态智能调整列车的牵引/制动曲线, 确保多列车追踪间隔的稳定性。

在CBTC系统的兼容性调度中, OC设备优化了进路管理粒度, 将TACS的动态资源指令(如“道岔SW1508占用”)转换为CBTC联锁系统可识别的固定进路信号(如“进路J01锁闭”)。当TACS列车占用某道岔时, OC设备将强制锁闭包含该道岔的所有CBTC进路, 并标记为“动态占用”。该机制虽在一定程度上增加了联锁逻辑的复杂度, 但通过全局时钟同步与双通道冗余通信, 有效保障了进路状态在多系统间的一致性。当TACS与CBTC列车竞争同一进路资源时, OC设备将依据预设的冲突决策方案, 优先响应TACS的动态请求; 同时, OC设备可通过虚拟进路预留机制, 在CBTC系统中预先分配冗余进路, 当TACS列车频繁占用关键道岔区域时, OC可提前为CBTC列车预留备选进路, 并通过DDS中间件将进路状态实时同步至车载VOBC, 以有效应对TACS动态资源抢占可能引发的连锁反应。

4.3 多模式降级管理

在TACS模式下, 若发生车-地或车-车通信中断, 则OC设备将立即启用安全防护模块, 依托多传感器融合技术实时生成限速运行路径, 并通过车载HMI推送至司机; 同时, OC设备强制回收异常列车占用的资源点, 通过ATS系统重新分配给后续列车, 有效避免资源死锁。对于车载设备故障场景, OC设备基于故障类型动态调整防护策略: 若列车丧失自主运行能力, OC将生成一条从当前位置至前方站台的低速引导路径, 该路径自动绕过冲突资源点(如已占用的道岔或封锁区段), 并通过LTE-M网络广播虚拟防护区(覆盖故障列车前后200 m范围), 确保相邻列车的MA终点自动回撤至安全边界。

在CBTC后备模式中, OC设备依赖轨旁既有设备

实现降级运行控制。当车载VOBC与地面设备通信中断时, 列车通过有源应答器获取点式移动授权, 司机依据地面信号机显示及限速码进行人工驾驶。OC设备同步监控联锁区段的占用状态, 若检测到列车偏离授权范围, 则立即触发紧急制动。在此模式下, OC通过将动态资源状态映射为联锁进路逻辑, 确保既有CBTC系统功能不受影响, 维持系统降级后的基本运行安全。

5 性能验证与仿真分析

为验证OC设备在混合运营场景下的综合性能, 本文以合肥地铁某典型枢纽站为原型, 搭建了高精度仿真测试环境。该仿真模型基于MATLAB/Simulink平台开发, 覆盖TACS与CBTC混合调度、资源抢占冲突、列车降级运行等多种典型运营场景。

5.1 资源管理效率验证

在TACS-CBTC混合调度场景中, 设置20列交替运行的TACS与CBTC列车, 测试OC设备对道岔资源的动态分配效率, 关键性能指标对比如表3所示。仿真结果表明: 在TACS模式下, OC设备通过动态抢占机制将道岔资源平均占用时间从18 s缩短至8 s, 资源利用率提升约55.6%; 在CBTC模式下, 资源分配延迟降至0.8 s, 较传统系统提升33.3%。此外, 在多制式冲突场景下, OC设备平均响应时间为2.1 s, 通信误码率稳定低于 1×10^{-6} , 充分验证了所提资源管理方案的高效性与可靠性。

表3 资源管理性能对比

Table 3 Comparison of resource management performance

指标	传统设备	OC设备	提升率/%
TACS资源占用时间/s	18	8	55.6
CBTC分配延迟/s	1.2	0.8	33.3
冲突响应时间/s	5.3	2.1	60.4
资源误码率	1.2×10^{-5}	$<1\times10^{-6}$	91.7

5.2 混合调度场景兼容性验证

为验证OC设备在TACS与CBTC混合调度场景下的兼容性, 本文结合合肥地铁某枢纽站的实际线路参数(见表4)与OC设备功能特性, 设计了交替折返与资源竞争典型场景, 分析多制式协同运行效率, 场景拓扑如图4所示。

表4 混合调度场景仿真环境参数

Table 4 Simulation environment parameters for mixed scheduling scenarios

参数类型	取值/描述
线路拓扑	一组9号双动道岔
道岔侧向限速/(km·h ⁻¹)	35
列车编组	6节编组, 长度140 m
通信协议	TACS (LTE-M) /CBTC (IEEE 802.11n)
仿真时长	高峰时段连续运行2 h

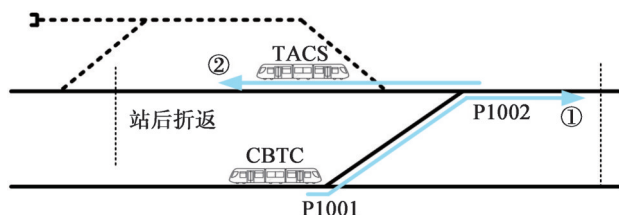


图4 多制式交替折返与资源竞争场景搭建

Fig. 4 Scenario construction for multi-system alternating turnarounds and resource competition

在该场景中, TACS列车先向OC设备申请道岔P1001的反位资源及相关侧防区资源, 离站经过P1001后继续申请P1002的反位资源与侧防区资源, 运行至折返轨停车换端; 此时, 后续CBTC列车进站停车, 仅可申请P1002的可动区资源。待TACS列车完成换端操作后, 申请P1002的定位资源与侧防区资源, OC设备允许相应资源释放后将道岔P1002扳至定位; TACS列车向站台运行并出清道岔P1002后释放该资源, CBTC列车方可申请P1002资源及相关侧防区资源, 驶向折返轨完成作业。

仿真结果显示, TACS列车通过OC设备的动态资源申请机制, 将折返间隔从116 s优化至95 s, 与文献[11]中TACS独立场景约18%的效率提升情况一致; 同时, OC设备通过优先级仲裁(TACS动态请求优先CBTC固定进路)与虚拟进路预留策略, 有效降低了系统资源冲突概率, 验证了其在多制式混合场景下的协同控制能力。

5.3 降级模式场景验证

为验证降级模式下OC设备的多系统协同防护能力, 本文基于折返线场景(包含3‰上坡、2‰下坡及平坡区段), 设计了TACS列车突发车-地通信中断的典型故障场景, 仿真参数依据实际线路条件及相关轨道交通行业标准^[12-13]确定, 以下进行具体分析。

①列车及线路参数: 列车平坡基础制动减速度为1.2 m/s², 梯度修正系数 k 的取值见式(1)。

②传感器性能: 雷达定位误差为 ± 0.3 m ($w_1=0.6$), 视觉识别误差为 ± 0.5 m ($w_2=0.3$), 应答器定位误差为 ± 0.1 m ($w_3=0.1$); 其中, w_1 、 w_2 、 w_3 为3种传感器性能权重。

③系统响应时间: 通信延迟取LTE-M实测均值50 ms, 车载决策时间取80 ms, 因此系统总响应时间 $t_{\text{sys}}=130$ ms。

④安全冗余距离: $\Delta s=2$ m。

依据上述参数进行故障注入与防护激活, 当TACS列车以40 km/h(即11.1 m/s)的速度运行至下坡区段时, 模拟LTE-M通信中断, 系统立即触发安全防护模块。计算下坡修正后的 $a_{i,\text{max}}=1.44$ m/s², 将其代入式(1)可得 $L\approx 46.24$ m。根据式(2)计算安全裕量, 传感器最大误差 $\sigma_{\text{max}}=0.5$ m, 故障列车预期恢复时间 $t_{\text{re}}=10$ s(含重启与同步时间), 则 $D_{\text{res}}=112.84$ m, 即最终列车前后虚拟防护区长度为 $L+D_{\text{res}}=159.08$ m。

OC设备通过DDS中间件向相邻CBTC列车广播防护区信息, 并将其转换为CBTC系统可识别的虚拟限速区段。传统CBTC系统在此类场景下通常依赖人工确认并设置防护区, 耗时较长; 而本方案经多次仿真测试, 防护区生成与发布平均耗时约5 s, 显著优于传统方式, 从而验证了式(1)与式(2)所定义模型的工程适用性与实效性。

6 结论

本文针对城市轨道交通新旧线路混合运营引发的系统兼容性工程难题, 提出并验证了一种支持TACS与CBTC多制式融合的OC设备架构。通过系统性仿真测试与分析得出以下结论:

①所提OC设备在资源管理效率方面实现显著突破。测试结果表明, 在TACS系统中, 基于动态抢占的资源管理机制将道岔资源占用时间从传统系统的18 s缩至8 s, 资源利用率提升约55.6%; 通过统一的资源状态映射机制, OC设备在CBTC模式下的资源分配延迟降至0.8 s, 多制式冲突场景下的平均响应时间优化至2.1 s, 通信误码率稳定在 1×10^{-6} 以下, 展现出优异的兼容性与可靠性。

②在多制式交替折返与资源竞争的复杂场景下, OC设备通过动态资源申请与智能调度机制, 将列车折返间隔从116 s压缩至95 s。在保证各制式系统独立运行逻辑的前提下, 实现了跨系统资源的动态协调与高效利用, 为混合运营场景下的灵活调度与效能提升提供了关键技术支持。

③故障注入测试验证了所提架构在降级模式下的有效性。OC设备能快速生成防护区并实现多模式协同防护, 平均响应时间约5 s, 显著提升了系统在故障场景下的恢复能力与安全水平。

④在工程实践层面, 该OC设备通过统一通信协议与标准化数据封装, 显著降低了异构系统间的接口复杂度, 确保既有CBTC系统能通过OC设备平滑接入新型TACS架构, 有利于大幅缩短工程改造与系统调试周

期, 具有较大的应用推广价值。

未来研究可进一步将该设计扩展至其他制式混跑场景, 并探索其与云边协同计算、人工智能调度等智慧轨道方向的深度融合, 持续推动轨道交通系统向全自主化、智能化方向演进。

参考文献:

- [1] 卿建强, 雷成健, 梁波. 列车自主运行控制系统研究[J]. 控制与信息技术, 2021(4): 95-102.
QING Jianqiang, LEI Chengjian, LIANG Bo. Research on train autonomous circumambulation system[J]. Control and information technology, 2021(4): 95-102.
- [2] 姜坚华, 崔科. 城市轨道交通列车运行控制系统的发展方向[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 6-9.
JIANG Jianhua, CUI Ke. Development trend of urban rail transit train control system[J]. Urban mass transit, 2020, 23(11): 6-9.
- [3] 汪小勇. 城市轨道交通基于车车通信的列车自主运行系统探讨[J]. 中国铁路, 2020(9): 77-81.
WANG Xiaoyong. Discussion on train autonomous circumambulate system based on vehicle-to-vehicle communication in urban rail transit[J]. Chinese railways, 2020(9): 77-81.
- [4] 罗情平, 吴昊, 陈丽君. 基于车-车通信的列车自主运行系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(7): 46-49.
LUO Qingping, WU Hao, CHEN Lijun. Train autonomous circumambulate system based on train to train communication[J]. Urban mass transit, 2018, 21(7): 46-49.
- [5] 杜建新. 城市轨道交通车车通信信号系统的控制思想[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(增刊2): 21-23.
DU Jianxin. Control of train-to-train communication signal system in urban rail transit[J]. Urban mass transit, 2016, 19(Suppl 2): 21-23.
- [6] 王鹏. 车-车通信技术在列控系统车载设备中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
WANG Peng. Applied research of train to train communication technology in onboard equipment of train control system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [7] 郑艺, 张伟, 沈涛, 等. 基于车-车通信的CBTC系统自动折返方案[J]. 控制与信息技术, 2019(5): 68-71.
ZHENG Yi, ZHANG Wei, SHEN Tao, et al. Automatic turn-back scheme for CBTC system based on train to train communication[J]. Control and information technology, 2019(5): 68-71.
- [8] 徐纪康. 基于车-车通信的新型CBTC系统分析[J]. 铁道通信信号, 2014, 50(6): 78-80.
XU Jikang. Analysis of a new CBTC system based on train-train communication[J]. Railway signalling & communication, 2014, 50(6): 78-80.
- [9] 姜宏阔, 任颖. 车车通信CBTC系统对象控制器设计[J]. 控制与信息技术, 2018(3): 52-55.
JIANG Hongkuo, REN Ying. Design of the object controller for vehicle-to-vehicle CBTC system[J]. Control and information technology, 2018(3): 52-55.
- [10] 杜恒, 孙军国, 张强, 等. 基于地面无联锁及区域控制器的新一代CBTC系统方案[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(4): 91-95.
DU Heng, SUN Junguo, ZHANG Qiang, et al. A new generation of CBTC system without CI and ZC[J]. Urban rapid rail transit, 2017, 30(4): 91-95.
- [11] 张绍围, 张成国, 潘亮, 等. 基于道岔资源的TACS折返效率分析仿真[J]. 铁道通信信号, 2025, 61(4): 75-80.
ZHANG Shaowei, ZHANG Chengguo, PAN Liang, et al. Analysis and simulation of TACS turn-back efficiency based on turnout resources[J]. Railway signalling & communication, 2025, 61(4): 75-80.
- [12] 国家铁路局. 铁路信号设计规范: TB 10007—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway signaling: TB 10007—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [13] 全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会(SAC/TC 278). 轨道交通自动化的城市轨道交通(AUGT)安全要求 第1部分: 总则: GB/T 32588.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Technical Committee on Electric Equipment and Systems for Railways of Standardization Administration of China(SAC/TC 278). Railway applications—automated urban guided transport(AUGT)—safety requirements—part 1: general: GB/T 32588.1—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.

Study of a multi-system compatible object controller

LIU Xiao

(Hefei Rail Transit Group Co., Ltd., Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: To address compatibility challenges arising from the upgrading and renovation of existing urban rail transit lines and the phased opening of new lines, this paper proposes an object controller (OC) that supports multi-system collaborative operation. Through an in-depth analysis of core differences in resource management paradigms and communication protocols between the train autonomous circumambulate system (TACS) and the communication-based train control system (CBTC), an OC architecture was designed based on a unified communication protocol and dynamic resource scheduling strategy. Compared with the OC in the traditional TACS mode, this architecture can be flexibly reconfigured to support different train control system modes, effectively meeting diverse requirements including intelligent train dispatching, safety protection, and degraded operation management. Experimental results showed that the proposed OC improved the resource management efficiency by 55.6% in the TACS mode, and also demonstrated excellent compatibility and reliability in the CBTC system environment. By significantly reducing complexity in intersystem interfaces, this solution shortens the engineering implementation and debugging cycles, and provides strong technical support for the safe and efficient operation of mixed scenarios involving new and old rail transit lines.

Keywords: urban rail transit; object controller; multi-system compatibility; autonomous train operation; dynamic resource management; simulation

收稿日期: 2025-03-07; 修回日期: 2025-05-29