

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.01.022

列车自主运行系统降级方案 工程适用性研究

傅佳伟

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 列车自主运行系统(train autonomous circumambulate system, TACS)是未来城市轨道交通信号系统的发展方向, 目前在部分城市轨道交通中得到应用。不同于传统的基于通信的列车自动控制系统(communication based train control system, CBTC), TACS 系统降级方案尚未形成统一标准, 有必要针对现有 TACS 系统降级方案进行工程适用性分析。基于 TACS 工作原理, 探讨配置降级系统的必要性; 结合 TACS 系统现阶段发展现状, 总结了 3 种现有可行的 TACS 降级方案, 介绍不同降级方案的架构和工作原理, 并从系统构成、应用场景、降级下追踪能力等层面对 3 种 TACS 降级方案进行定性分析; 建立降级下列车追踪时间模型, 在相同工程条件下, 对 3 种 TACS 降级方案的降级列车追踪场景进行仿真, 根据仿真结果得出影响降级追踪效率的因素。在上述研究基础上, 总结 TACS 降级系统的关键条件, 对 3 种降级方案的工程适用性、应用效果进行分析, 并提出部分改进建议。

关键词: 城市轨道交通; 列车自主运行系统; 降级; 轨旁列车管理; 自主感知; 追踪能力

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)01-0164-07

Research on Engineering Applicability of Degradation Modes for Autonomous Train Operation Systems

FU Jiawei

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063)

Abstract: The Autonomous Train Operation System (TACS) is the development direction of future urban rail transit signal systems and is partly being applied in some urban rail transit. Different from traditional Communications-Based Train Control (CBTC), no unified TACS standard has been established yet. This paper aims to analyze the engineering applicability of existing TACS system degradation schemes. Based on the working principle of TACS, this paper discusses the necessity of configuring a degraded system. Drawing from the current development status of the TACS system, this paper summarizes three feasible TACS degradation schemes, introduces the architectures and working principles of different degradation schemes, and qualitatively analyzes the three TACS degradation schemes from the aspects of system composition, application scenarios, and tracking ability under degradation situation. The study establishes the train tracking time model under degradation situation, and simulates the degradation train tracking scenarios of three TACS degradation schemes under the same engineering conditions. Based on the simulation results, it identifies the factors that affect the efficiency of degradation tracking. Building on the above research, the key conditions for the TACS degradation system are summarized, and the engineering applicability and application effects of the three degradation schemes are analyzed, leading to several improvement suggestions. The results of this study have significant implications for

收稿日期: 2024-03-01 修回日期: 2024-05-22

作者简介: 傅佳伟, 男, 硕士, 工程师, 从事城市轨道交通自动化技术研究, 395752041@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4302504); 铁四院科研(2024-G102401KYYHC)

引用格式: 傅佳伟. 列车自主运行系统降级方案工程适用性研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(1): 164-170.

FU Jiawei. Research on engineering applicability of degradation modes for autonomous train operation systems[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(1): 164-170.

the promotion and application of Train Autonomous Operation System.

Keywords: urban rail transit; TACS; degradation system; trackside train management; autonomous perception; tracking ability

目前,随着城市轨道交通的不断发展和运营需求的不断提高,传统基于通信的列车自动控制系统(CBTC系统)受限于其系统原理及系统构架,很难进一步提高系统能力及行车灵活性。在既有CBTC线路改造时,由于其室内外设备相对较多,安装空间、电缆敷设存在很大困难,与既有系统过渡倒切过程复杂、难度大^[1-4]。

针对传统CBTC存在的不足,一种基于全新设计理念的列控系统-列车自主运行系统(TACS)应运而生。TACS以车载控制器为核心,减小了各子系统之间的耦合度,为信号系统的模块化、标准化、互联互通以及全自动运行提供了更优的解决方案,精简的轨旁设备更适用于既有线路信号系统的改造。

目前,列车自主运行系统已在部分城市的轨道交通中得到一定应用,正在逐步走向成熟:青岛地铁6号线采用TACS制式,于2024年4月26日全线全功能开通运营;深圳地铁20号线作为全球首条TACS商业运营线路,于2021年12月开通试运营;除此之外,在建的太原地铁1号线、成都地铁30号线、北京地铁13A、13B信号改造、上海地铁3/4号线信号改造等工程均采用TACS系统。

近年来,已有部分学者针对TACS系统开展了相关研究,范永华等^[1]从线路资源理念出发,研究线路资源的划分和管理方式,并从基于车车通信的TACS层面分析线路资源管理的关键技术和主要功能。朱志伟等^[2]基于TACS线路资源管理的列车折返设计方案,对列车进/出自动化区域、列车进/出试车线时的区域边界管理问题提出了相应的解决方案。朱力等^[3]结合城市轨道交通TACS典型运行场景,对车车通信距离进行建模仿真计算与分析。陈凯^[4]提出一种基于TACS的车辆、信号系统融合的虚拟重联方案。刘振宇^[5]使用STPA法对TACS系统关键设备(资源管理单元)的安全性进行研究。

不同于传统CBTC,目前TACS系统在工程应用较少,TACS系统降级运行方案尚无统一标准,目前国内外相关研究内容较少。本文分析了TACS降级系统的必要性,从系统复杂性、追踪能力等层面对现有3种TACS降级方案进行对比研究,建立降级列车追踪模型并进行TACS降级下追踪能力仿真分析。在此基础上,总结了TACS降级系统的关键条件,对3种降级方案的工程适用性、应用效果进行了研究分析,并

提出部分改进建议,以期对未来列车自主运行系统(TACS)降级方案的工程应用以及标准化提供参考。

1 降级系统必要性分析

1.1 TACS 功能及工作原理

列车自主运行系统主要由地面目标控制器(object controller, OC)子系统、车载控制器(vehicle on-board controller, VOBC)子系统、列车自动监控(automatic train supervision, ATS)子系统、数据传输系统(data communication system, DCS)子系统(含车地无线子系统)等构成,系统构成和工作原理如图1所示。相较于传统的CBTC,列车自主运行系统的VOBC集成了区域控制设备(zone controller, ZC)的功能以及ATS的部分功能,引入线路资源管理的理念,将列车的移动授权计算、地面控制系统的功能集成到VOBC,确保列车根据运行计划及线路资源分配状态和采集的表示状态信息自主规划办理路径,正确实现进路、道岔、信号机的联锁关系^[1]。

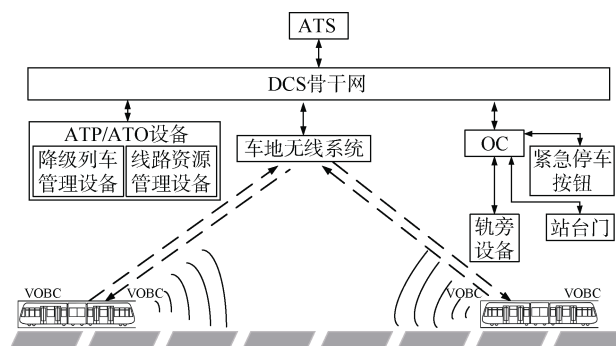


图1 列车自主运行系统(TACS)工作原理示意
Figure 1 Operating principle of Train Autonomous Operation System (TACS)

1.1.1 TACS 功能

- 1) ATS子系统: 下发时刻表或人工调整调度命令。
- 2) 车载VOBC子系统: 根据ATS命令自主规划行车路径,根据行车路径内对资源的需求,向相邻列车发送线路资源申请和释放信息;VOBC在获得该资源后向OC发送对该资源的控制命令,同时接收OC发送的轨旁资源的状态表示信息;自主计算列车移动授权和控车速度曲线,对列车的安全运行进行防护。
- 3) 地面的OC设备: 更新线路资源登记,设备实现对转辙机、信号机等轨旁设备的控制,以及轨旁设备信息的采集。

4) DCS 系统: 负责各子系统、设备间列控信息传输。DCS 包括有线通信网络和车地无线通信网络两部分。

1.1.2 TACS 工作原理

1) VOBC 接收到 ATS 下发的时刻表或人工调整命令, 自主规划列车运行路径。

2) OC 负责区域内的列车管理与轨旁资源管理, 向 VOBC 发送轨旁设备状态信息, 通过车-地无线通信接收来自 VOBC 的资源申请, 根据资源申请控制轨旁设备。

3) VOBC 根据行车路径内对资源的需求, 向所需资源的持有列车主动建立通信, 向其发送对该资源的释放申请, 同时当前列车也接收其他列车发送的资源释放申请; VOBC 使用完该资源, 确认可以释放时, 将该资源释放移交给请求申请列车。VOBC 在获得该资源后即占有该资源, 可以根据时机向 OC 发送对该资源的控制命令, 同时接收 OC 发送的轨旁资源的状态表示信息。基于以上信息, VOBC 可自主计算列车移动授权和控车速度曲线, 对列车的安全运行进行防护^[1]。

1.2 TACS 配置降级系统必要性

不同于传统 CBTC, TACS 系统采用基于线路资源管理运行理念。因此, TACS 提升信号系统的集成程度, 减少轨旁设备, 可降低后期运维工作量, 同时在折返、追踪能力上相较于传统 CBTC 有较大提升。

但与此同时, 由于 TACS 以 VOBC 为核心, 资源申请和释放、移动授权计算、轨旁设备控制均由 VOBC 完成。一旦 VOBC 故障, 列车将降级为非通信车, 若不配置可靠的降级系统, 将会出现以下情况。

1) 降级列车无法自动进行资源申请和释放。由于列车降级为非通信车, 将丢失与地面设备的通信, 也无法与相邻列车建立通信。降级列车将无法进行资源的申请和释放, 也无法向 OC 发送轨旁设备的控制命令, 列车将无法计算移动授权。为保障安全, 列车将制动停车, 等待司机登乘处理。

2) 地面无降级信号。地面不配置降级信号, 降级列车仅能通过调度人员人工确认故障列车迁移线路资源空闲后, 人工进行资源申请和占用, 司机根据行调指令将故障列车迁移, 列车迁移效率低, 且司机驾驶风险高, 列车运行安全由司机和调度人员共同保证。

3) 相邻列车无法向故障列车进行线路资源申请

和释放。相邻列车将无法从故障车辆获取移动授权, 也无法申请线路资源。因此, 只有当故障列车迁移出当前区间后, 由调度人员人工释放线路资源, 相邻列车方能恢复运行。

由此可见, 若 TACS 不配置可靠的降级系统, 将会导致当前故障区间无法正常通行列车, 故障恢复时间长, 对运营影响较大。

2 TACS 降级方案

目前工程中 TACS 系统应用较少, 截至 2024 年 4 月, 已载客运营的 TACS 线路仅深圳地铁 20 号线, TACS 系统架构、降级方案无统一标准, 目前不同集成商 TACS 架构采用不同的降级方案, 且部分降级方案尚未进行工程应用和验证。结合现有 TACS 技术架构, 可以应用于 TACS 降级的有以下 3 种方案。

1) 基于联锁的降级方案。目前, 富欣智控和众合科技在青岛地铁 6 号线试验线中采用基于联锁的降级方案。通过具备联锁功能的目标控制器或者单独设置联锁设备实现联锁进路防护功能, 通过列车区段占用检测设备(如计轴)实现联锁设备对列车位置的判断, 如图 2 所示。当列车降级后, 车载子系统虽然无法自主实现资源申请和释放, 但是仍旧可以依靠地面联锁实现对降级列车的进路防护: 即司机登乘列车后, 凭借地面降级信号驾驶列车运行。司机出清当前区段后, 联锁向地面 OC 释放线路资源, 后车可驶入当前释放的线路资源, 从而保障一定的通信车和非通信车混行效率。

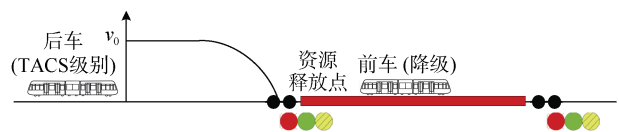


图 2 基于区段占用检测的降级列车运行示意

Figure 2 Schematic diagram of degraded train operation based on section occupancy detection

2) 基于轨旁列车管理的降级方案。通过在地面设置降级列车管理器实现对故障列车的管理和跟踪, 当列车降级时, 降级列车管理器替代故障列车与相邻列车进行信息交互, 实现线路资源的申请及释放。原理如图 3 所示。

该降级方案的核心是需要实现列车降级情形下的自主定位, 并将定位信息发送至降级列车管理器, 为降级列车释放线路资源提供依据。为避免列车车载设备故障影响定位信息发送, 车载另外配置一套后备定

位主机和通信单元,实现列车定位及传输模块的冗余。列车后备定位系统和 TACS 系统车载设备共享车载应答器天线,在原有车载设备基础上,配置额外的定位计算设备和车地通信设备,系统架构如图 4 所示。

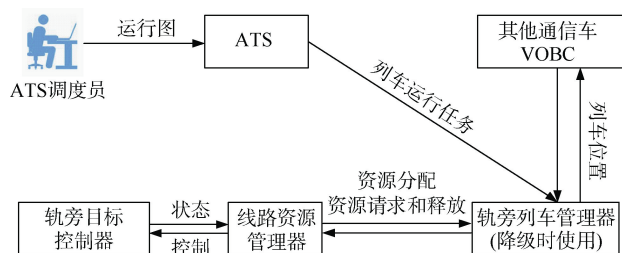


图 3 基于轨旁列车管理降级方案示意

Figure 3 Schematic diagram of the degradation system based on trackside train management

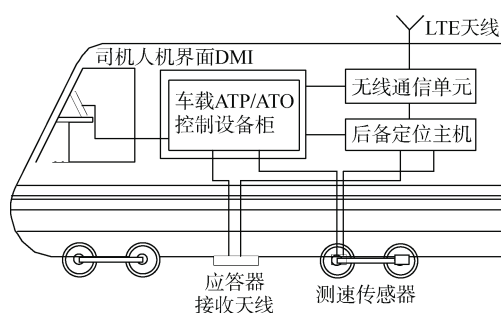


图 4 车载后备定位设备配置示意

Figure 4 Schematic diagram of backup positioning equipment

目前,卡斯柯在深圳地铁 20 号线中采用基于轨旁列车管理的降级方案,并预计在深圳地铁 20 号线二期工程、上海地铁 3/4 号线信号改造工程中应用列车后备定位设备。

3) 基于环境自主感知的降级方案。自主感知系统配置激光雷达、毫米波雷达、摄像头等设备,用于采集线路环境信息。配置车载自主环境感知主机,存储经样本训练后的线路特征数据,系统架构示意如图 5 所示。

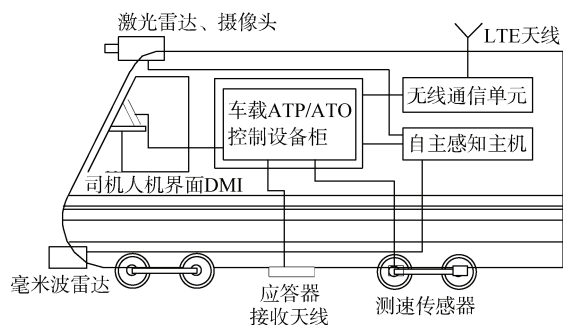


图 5 基于主动感知的降级系统示意

Figure 5 Schematic diagram of the degradation system based on self-awareness

当信号车载计算机(carborne controller, CC)故障时,自主感知系统通过机器视觉和激光雷达对周围环境感知,并与线路特征数据进行比对,实现高精度列车自主定位,并将位置信息通过车地无线通信设备发送至地面列车自动防护系统(automatic train protection, ATP),地面 ATP 根据降级列车位置释放线路资源、开放信号,提升通信车和非通信车的混行效率。同时,对信号灯或前方障碍物(车辆、人或其他物体)进行持续识别,并与 ATP 系统接口,当发现障碍物或紧急情况时,提供预警信息并施加紧急制动,提高无人值守下的列车自动运行(unattended train operation, UTO)的安全等级。

目前交控科技基于环境自主感知的降级系统已通过 SIL4 安全完整性等级认证,拟在成都地铁 30 号线、太原地铁 1 号线等在建线路应用,截至目前,尚未在开通运营线路得到工程验证。

3 降级方案比较分析

以上 3 种降级方案均具备对非通信列车的安全防护功能,并且为相邻列车提供了资源申请和释放方式,保障了一定的通信车和非通信车的混行效率,但在系统复杂性以及降级后运营能力等方面存在差异。

3.1 降级方案特点分析

1) 基于联锁的降级方案在传统 CBTC 中广泛应用,优点是成熟可靠,可通过进路联锁关系保证降级列车的运行安全。但对于未发生降级的列车, TACS 系统以车载设备为核心,其基于线路资源管理的列车控制理念与联锁系统存在差异,无法与 TACS 车载设备适配。降级列车的迁移安全由司机凭借地面信号保证,不具备列车防护功能,降级列车区间的运行效率受降级列车迁出区间的影响。同时,其在系统构成方面需要增加联锁主机、联锁接口设备、列车占用检测设备大量地面设备,系统构成复杂^[6-9]。

2) 基于轨旁列车管理的降级方案可以实现降级列车下的自主定位,并通过车地无线系统实时将降级列车位置提供给轨旁,由轨旁设备代替故障车辆完成资源的申请和释放。该降级方案需要在地面配置降级列车管理器,车载需要配置列车后备定位系统,系统构成较简单,且符合 TACS 技术架构,可提升通信车和非通信车的混行效率,但无法对降级列车进行安全防护,降级列车的运行安全由司机和调度人员共同保证。在该方案下,降级列车的资源释放需依赖可靠的车地

无线通信，将降级列车位置信息实时传送至轨旁，以释放线路资源。若降级列车车地无线通信故障，则需降级列车驶出当前区间后，由司机告知行调列车位置信息，行调人工进行资源释放。

3) 基于环境自主感知的降级方案能够实现降级列车的安全防护，在设备构成方面，主要增加了车载设备，系统构成精简，符合 TACS 以车载为核心的控制理念。降级列车能够实现实时定位，并及时释放线路资源，提升通信车和非通信车的混行效率。但系统依赖于采用基于图像分析的列车控制逻辑，其安全性和可靠性需进行进一步验证。同时，当列车行驶在弯道等非开阔区域时，该降级方案的性能也会受到影响。

3.2 降级方案追踪能力分析

3.2.1 TACS 降级下列车追踪模型

由于目前 TACS 只能实现“撞硬墙”追踪防护，本文采用“撞硬墙”追踪间隔模型对降级下列车追踪情况进行分析，即追踪间隔仅考虑当前位置信息，不考虑前车的速度和制动距离^[10]。

采用基于联锁的降级方案时，仅当降级列车出清当前计轴区段后，方能释放当前计轴区段的线路资源，因此资源释放点应为列车出清的最后一个计轴点，如图 6 所示。后车将资源释放点作为 ATP 防护打靶点，计算速度-距离曲线防护列车运行。只有当降级列车出清下一个计轴点时，后车才能更新线路资源，驶入下一个计轴区段。

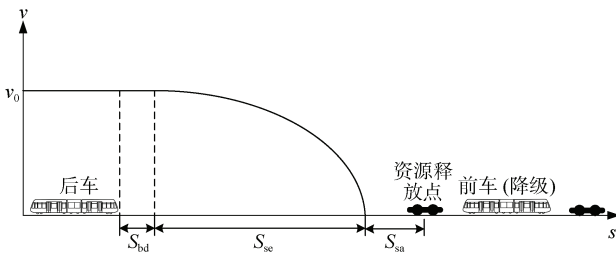


图 6 联锁降级方案下列车追踪示意

Figure 6 Train tracking diagram under interlocking degradation scheme

采用基于轨旁列车管理、环境自主感知的降级方案时，由于降级列车可将实时定位信息通过车地无线通信发送至轨旁，因此资源释放点应为前车的尾端，如图 7 所示。当前车降级运行时，不断将降级列车的位置传输至轨旁和后车，实时释放线路资源，后车根据线路资源占用情况实时计算速度-距离曲线防护列车运行。

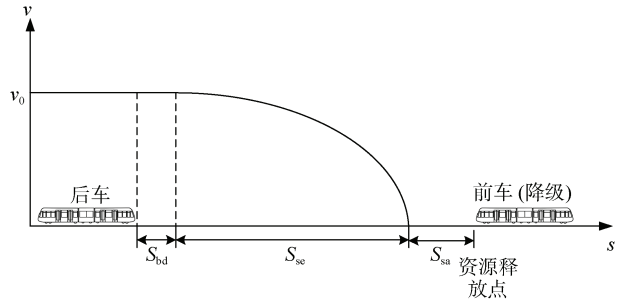


图 7 基于轨旁列车管理、环境自主感知降级方案下列车追踪示意

Figure 7 Train tracking diagram based on trackside train management and environmental autonomous perception degradation scheme

图 6 和图 7 中，列车的追踪间隔 S_{tr} 可以表示为：

$$S_{tr} = S_{bd} + S_{sc} + S_{sa} \quad (1)$$

式中， S_{bd} 为制动命令施加延迟过程后车的行走距离； S_{sc} 为后车实际制动后初始速度 v_0 制动到零速的行走距离； S_{sa} 为后车与降级下前车资源释放点的安全距离。

其中，制动命令施加延迟过程后车的行走距离 S_{bd} 可以表示为：

$$S_{bd} = v_0 (T_{re} + T_{ex} + T_{br}) \quad (2)$$

式中， T_{re} 为车载设备反应时间； T_{ex} 为牵引切除时间； T_{br} 为常用制动建立时间。

假设列车采用匀减速度 a_{br} 追踪，实际制动后到零速的行走距离 S_{sc} 可以表示为：

$$S_{sc} = \frac{v_0^2}{2a_{br}} \quad (3)$$

后车与降级下前车资源释放点的安全距离 S_{sa} 由测距误差 L_{er} 、安全裕量 L_{pr} 、通信时延导致的运行距离 d_e 组成，可以表示为：

$$S_{sa} = L_{er} + L_{pr} + d_e \quad (4)$$

假设列车采用匀减速度 a_{br} 追踪，通信时延 T_{dc} 导致的运行距离 d_e 可以表示为：

$$d_e = \int_t^{t+T_{dc}} (v_0 + a_{br}t) dt \quad (5)$$

那么后车与降级车之间的追踪时间间隔 T_{tr} 可以表示为：

$$T_{tr} = \int_0^{S_{bd}+S_{sc}} \frac{1}{v(s)} ds \quad (6)$$

式(6)中， $v(s)$ 表示后车在位置 s 下列车的行驶速度，可以表示为：

$$v(s) = \begin{cases} v_0 & 0 \leq s < S_{bd} \\ \sqrt{2a_{br}(s - S_{bd})} & S_{bd} \leq s < S_{bd} + S_{sc} \end{cases} \quad (7)$$

3.2.2 不同降级方案下追踪能力仿真分析

根据 3.2.1 节中 TACS 降级下列车追踪模型,对基于联锁、轨旁列车管理、环境自主感知 3 种 TACS 降级方案追踪能力进行仿真。

模拟一个站间距为 3 km 的区间,前车在出清车站 1 后,随即发生降级。后车采用 TACS 模式,按照最大能力追踪,仿真方案如图 8 所示。

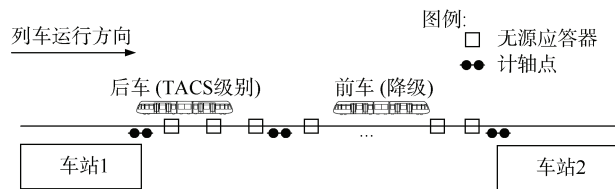


图 8 降级下追踪仿真方案示意

Figure 8 Schematic diagram of tracking simulation scheme under degradation

部分主要仿真参数如表 1 所示。根据式(1)~式(7),仿真计算出 3 种 TACS 方案的最小追踪间隔 T_{tr} 。

表 1 TACS 降级下追踪主要仿真参数

Table 1 Tracking simulation parameters under the TACS degradation

列车参数	数值
列车最大运行速度 V_0 /(km/h)	80
通信延时 T_{de} /s	0.15
车载设备反应时间 T_{re} /s	0.2
牵引切除时间 T_{ex} /s	0.15
常用制动建立时间 T_{br} /s	1.0
常用制动减速度 a_{br} /(m/s ²)	-0.6
测距误差 L_{er} /m	4
安全裕量 L_{pr} /m	55

1) 基于联锁的降级方案。针对不同降级列车行驶速度、计轴布置间隔,对降级下列车追踪时间间隔 T_{tr} 进行仿真,仿真结果如图 9 所示。由仿真结果可以看出,通信车和非通信车混行效率受降级列车行驶速度、计轴布置方案影响:降级列车运行速度越高,计轴区段越短(计轴布置越密集),追踪能力越高。

2) 基于轨旁列车管理的降级方案。针对不同降级列车行驶速度、应答器布置间隔,对降级下列车追踪时间间隔 T_{tr} 进行仿真,仿真结果如图 10 所示。仿真结果表明:通信车和非通信车混行效率受应答器布置间隔、降级列车行驶速度影响,应答器布置越密,降级列车行驶速度越快,越能更快地实现降级列车后备定位,追踪能力越高。

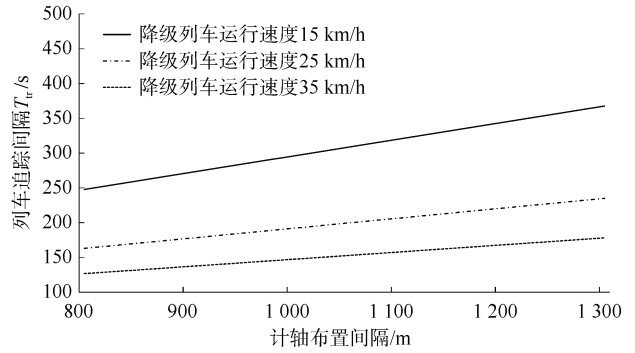


图 9 基于联锁的降级方案追踪间隔示意

Figure 9 Schematic diagram of tracking interval of interlocking degradation

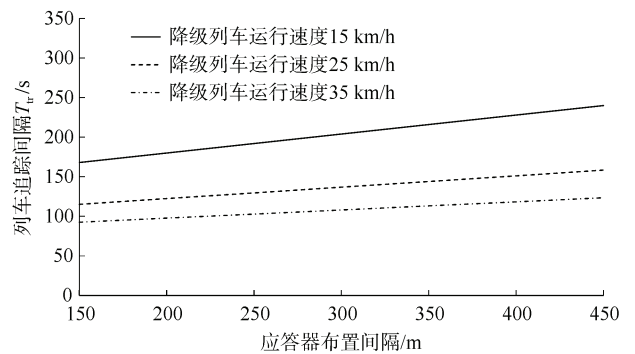


图 10 基于轨旁列车管理的降级方案追踪间隔示意

Figure 10 Schematic diagram of tracking interval of trackside train management

3) 基于环境自主感知的降级方案。基于自主感知的降级方案能够实现列车定位,并根据定位实时释放线路资源。针对不同降级列车行驶速度,对降级下列车追踪时间间隔 T_{tr} 进行仿真,仿真结果如图 11 所示。仿真结果表明:基于自主感知的方案降级下追踪能力受降级列车行驶速度影响,降级列车行驶速度越快,追踪能力越高。

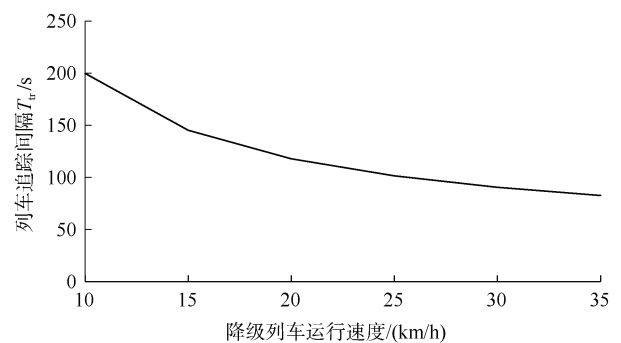


图 11 基于自主感知的降级方案追踪间隔示意

Figure 11 Schematic diagram of tracking interval of self-awareness program

4 结论

本文根据 TACS 技术架构,探讨了配置降级系统的必要性,并针对现有 3 种降级方案分析了降级方案特点和能力,得出以下结论。

1) TACS 降级系统关键有两点:一是保证降级列车的运行安全;二是能够快速实现降级列车资源的释放,从而提升后车运行效率。

2) TACS 采用车载为核心的技术理念,基于联锁的降级方案虽然成熟可靠,但其需要增加大量的地面设备,与 TACS 系统技术理念相悖,同时其降级能力受制于计轴区段布置,不建议作为 TACS 的降级方案。

3) 基于轨旁列车管理的降级方案符合 TACS 的技术理念,且对于降级后通信车和非通信车的混行效率有较大提升。但该方案需依赖车地无线通信可靠运行,实时将降级列车位置信息传送至轨旁以释放线路资源。因此,在工程实施时建议考虑构建备用车地无线通信网络,以提高降级方案的可用性。

4) 基于环境自主感知的降级方案采用图像分析的列车控制逻辑,其性能受图像分析精度、工程条件等因素影响,安全性和可靠性需要进一步工程论证。

目前,TACS 系统降级方案尚未形成统一标准,不同供应商 TACS 系统对各降级方案的兼容性不同。但随着北京地铁 11 号线、上海地铁 3/4 号线信号改造项目、成都地铁 30 号线、太原地铁 1 号线等 TACS 项目陆续开通,工程进一步应用,TACS 降级方案将趋于成熟。

参考文献

[1] 范永华,李聪.基于车车通信的列车运行控制系统在城市轨道交通中的应用方案[J].城市轨道交通研究,2022,25(11):129-133.
FAN Yonghua, LI Cong. Application scheme of vehicle-to-vehicle communication based control system in urban rail transit[J]. Urban mass transit, 2022, 25(11): 129-133.

[2] 朱志伟,李聪.基于车车通信的地铁列车自主运行系统线路资源管理方案研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(10):137-140.
ZHU Zhiwei, LI Cong. Research on wayside infrastructure management scheme in metro train autonomous control system based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban mass transit, 2021, 24(10): 137-140.

[3] 朱力,唐涛,龚泰源,等.面向城市轨道交通列车控制系统的车车通信技术探讨[J].都市轨道交通,2023,36(6):

13-21.
ZHU Li, TANG Tao, GONG Taiyuan, et al. Train-to-train communication technology for train control system in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(6): 13-21.

[4] 陈凯.基于车车通信的虚拟重联技术研究[J].都市轨道交通,2023,36(1):22-27.
CHEN Kai. Research of virtual coupling technology based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 22-27.

[5] 刘振宇,李晶.车车通信列控系统资源管理单元安全性分析[J].都市轨道交通,2022,35(2):143-148.
LIU Zhenyu, LI Jing. Security analysis of resource management unit of vehicle-vehicle communication train control system[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 143-148.

[6] 郑生全,朱东飞,李东.CBTC 降级及后备运营系统方案与优化设计[J].铁道通信信号,2014,50(11):46-49.
ZHENG Shengquan, ZHU Dongfei, LI Dong, et al. Design on CBTC downgrade and backup operation system program and optimization [J]. Railway signalling & communication, 2014.

[7] 江明,张万强,张嘉扬.列车追踪间隔时间的分解及影响分析[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(7):1-9.
JIANG Ming, ZHANG Wanqiang, ZHANG Jiayang. Decomposition of train tracking interval and its impact analysis[J]. Railway signalling & communication engineering, 2023, 20(7): 1-9.

[8] 李聪.基于车车通信的列车自主运行系统优化设计方案研究[J].铁道通信信号,2023,59(2):64-69.
LI Cong. Research on optimization design scheme of train autonomous control system based on train-to-train communication[J]. Railway signalling & communication, 2023, 59(2): 64-69.

[9] 李伟,唐涛,王呈,等.无线通信延迟对城市轨道交通 CBTC 列车追踪间隔影响研究[J].铁道学报,2017,39(7):73-78.
LI Wei, TANG Tao, WANG Cheng, et al. Research on influence of wireless communication delay on CBTC train headway of urban rail transit system[J]. China industrial economics, 2017, 39(7): 73-78.

[10] 郑艺,胡云卿,耿宏亮,等.车车通信 CBTC 系统区间追踪间隔研究[J].控制与信息技术,2020(3):81-83.
ZHENG Yi, HU Yunqing, GENG Hongliang, et al. Research on Interstation Tracking Interval of CBTC System Based on Train-train Communication[J]. Control and information technology, 2020(3): 81-83.

(编辑:王艳菊)