

列车自主运行控制系统研究

卿建强, 雷成健, 梁波

(湖南中车时代通信信号有限公司, 湖南长沙 410100)

摘要: 文章分析了传统 CBTC 列控系统在我国城市轨道交通中的弊端, 介绍了列车自主运行控制系统 (TACS) 的系统架构、原理及典型核心功能, 并将 TACS 系统与传统 CBTC 进行了详细对比分析。TACS 以基于 LTE-M 的车-车/车-地通信为架构, 以列车自主运行路径、自主防护和自主运行调整为特征, 将轨旁核心控制功能移植至列车上; 同时列车运行控制系统与车辆网络控制、牵引和制动等系统高度融合。相较传统 CBTC 系统, TACS 架构更加简单合理, 能大大提高线路资源的利用率和系统的控制精度, 降低项目建设和运营成本 20%~30%, 项目工程施工、调试周期可缩短 20%~30%; 同时使列车运营组织也更加灵活, 可大幅提升线路运营效率, 列车运行系统更安全、可靠。

关键词: 城市轨道交通; 列车自主运行; 车车通信; CBTC

中图分类号: TP273+.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)04-0095-08

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.04.016

Research on Train Autonomous Circumambulation System

QING Jianqiang, LEI Chengjian, LIANG Bo

(Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Changsha, Hunan 410100, China)

Abstract: This paper analyzes the disadvantages of traditional CBTC system in China's urban rail transit, introduces the system architecture, principle and typical core functions of TACS (train autonomous circumambulation system), and gives a detailed comparison and analysis between TACS and traditional CBTC system. TACS is based on train to train and train to ground LTE-M-communication, which is based on train self-discipline, and characterized by train autonomous operation path, autonomous protection and autonomous operation adjustment. The trackside core control function is transplanted to the train. At the same time, TACS is highly integrated with vehicle network control, traction and braking system. Compared with the traditional CBTC system, the system architecture of TACS is simpler and more reasonable, which greatly improves the utilization rate of line resource as well as the control accuracy. In the meantime, it reduces the project construction and operation costs by 20%~30%, and also reduce the project construction and commissioning cycles by 20%~30%. Besides, TACS is also more flexible in operation organization, which greatly improves the line operation efficiency, and the system is safer and more reliable.

Keywords: urban rail transit; train autonomous circumambulation; vehicle-vehicle communication; communication based train control (CBTC)

0 引言

目前国内外城市轨道交通领域普遍采用传统

的基于通信的列车控制 (communication based train control, CBTC) 系统^[1], 其具有发车间隔小、运营效率较高等优势, 能够满足线路一定运输能力的需求。随着国内外城市轨道交通的大力发展和线路规模的不断扩大、轨道交通线路运营能力的需求不断提升, 传统的 CBTC 系统已无法满足运营效率继续提升、智能

收稿日期: 2020-09-17

作者简介: 卿建强 (1983—), 男, 工程师, 主要从事城轨信号系统研制和工程化工作。

基金项目: 湖南省长沙市科技重大专项 (kh2003030)

智慧城轨发展的要求。如何在保证行车安全的前提下大幅减少项目的建设和维护成本、同时最大限度地缩短列车运行间隔并提升线路的运能和运量,是目前城市轨道交通 CBTC 系统的技术研究方向。国外,法国阿尔斯通公司研发成功的 Urbalis Fluence 系统目前正在法国里尔地铁试用,该系统主要通过车-车通信、自主控车和资源细分等技术来提升地铁运能。国内,中车青岛四方车辆研究所有限公司和上海富欣智能交通控制有限公司等正在研发的列车自主运行系统将在青岛 6 号线进行试用;交控科技股份有限公司提出基于车-车通信的以列车为中心的列车控制概念,正筹划在北京大兴国际机场线和港铁迪斯尼线进行现场测试;卡斯柯信号有限公司目前正在同北京交通大学及其他科研单位合作进行基于车-车通信的列车运行控制系统的研究和试验^[2]。

列车自主运行控制系统 (train autonomous circumambulation system, TACS) 以基于 LTE-M (LTE Metro) 的车-车通信为架构,以列车自律为基础,以列车自主运行路径、列车自主防护和列车自主运行调整为特征。其将传统 CBTC 系统的轨旁核心控制功能移植至列车上,同时列车运行控制系统与车辆网络控制、牵引和制动等系统高度融合,减少轨旁设备数量,优化系统架构,有效减小列控信息通信传输时延,提高控制精度,缩短列车追踪间隔,大大提高运营效率,在节约建设成本和运营维护成本的同时也使列车在安全、智能、高效、经济方面有了明显的提升^[3-4],因此 TACS 是城市轨道交通列车控制系统的发展方向。

1 传统 CBTC 系统存在的问题

传统 CBTC 系统 (图 1) 采用连续的车-地-车双向通信链路和控制架构,通过不依赖轨旁列车占用检测设备的列车主动定位技术,使地面和车载列车控制设备通过车-地无线通信实时交互数据、协同配合,为列车提供连续的自动控制服务。系统将线路按区域划分为若干控制区,并在地面配置计算机联锁 (computer interlocking, CI) 系统、区域控制器 (zone controller, ZC) 系统、列车自动调度管理 (automatic train supervision, ATS) 系统等设备。列车上配置车载控制器 (vehicle on-board controller, VOBC) 系统,通过车-地无线通信持续与轨旁 ZC 交互数据;在区域控制分界处,车载 VOBC 持续与分界处两侧的 ZC 进行通信,实现区域控制切换。线路轨旁配置次级列

车占用检测设备、转辙机、信号机、有源和无源应答器等设备。

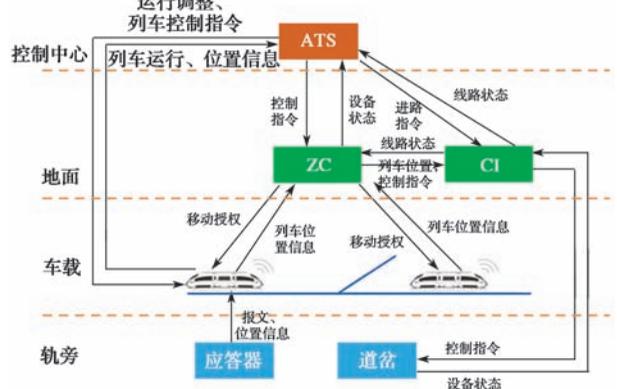


图 1 典型的传统 CBTC 信号系统架构
Fig. 1 Typical architecture of traditional CBTC

传统 CBTC 系统采用“车-地-车”的结构体系,存在如下主要问题^[5-7]:

(1) 列车与列车之间无法直接完成信息交互,不能自主计算行车许可范围。车载 VOBC 须接收轨旁 ZC 及 CI 和中心 ATS 设备的控制信息,基于轨旁的控制信息才能保证列车的正常安全运行;车载 VOBC、轨旁 ZC 设备、ATS 系统及 CI 系统之间均需进行大量的交互数据通信,信息周转及系统处理周期长,系统接口多且结构复杂。

(2) 列车运行对控制中心 ATS 系统和轨旁 ZC 设备依赖程度高。一旦 ATS 设备和 ZC 设备发生故障,列车则不能自动运行。

(3) 系统配置的地面控制设备和线路的轨旁设备数量众多,不仅提高了建设和维护成本,而且增加了故障点。

(4) 由于接口多且结构复杂,系统存在项目施工周期长、调试过程繁杂、故障影响范围大的缺点。

(5) 系统基于传统进路对进路内的资源点 (道岔、区段) 集中管理,线路资源利用率低。由于进路本身固有的属性,只能将进路内的资源点集中分配和管理,这会导致其对线路资源的利用率相对较低,不利于列车运行间隔以及线路运能运量的进一步提升,同时也降低了列车运营组织的灵活性。例如,对于对向运行列车,只能通过进路敌对冲突检查进行防护,确保两敌对进路不能同时建立,导致列车只能在允许对向运行的特定范围内才能进行对向运行;而对于救援、任意位置折返运行等特殊场景,系统则无法实现。此外,传统进路不能追踪办理折返进路,不利于 CBTC 系统进一步缩短折返时间、提升折返效率。

2 TACS 原理

TACS 基于对轨旁线路资源分散、精细化管理的理念,以列车为核心,通过LTE-M通信技术与车-车间、车-地间无线通信,列车车载VOBC持续与相邻列车、对象控制器(object control, OC)交互数据,实现轨旁线路资源分散管理,完成列车自主资源管理、自主运行调整及自主间隔防护等功能。

2.1 TACS 架构

TACS 主要由中心ATS系统、车站轨旁OC^[8]和车载VOBC设备组成(图2)。系统在车载VOBC上集成了原CBTC系统地面控制设备CI与ZC系统的核心处理功能^[9-11],地面仅保留了ATS系统、轨旁OC设备,大大简化了系统架构,减少了轨旁设备数量,优化了各子系统间接口,实现了列车的自主运行。车载VOBC通过LTE-M通信技术与相邻列车、OC交互数据,完成列车自主规划运行路径、自主资源管理、自主运行防护等功能;轨旁线路仅配置转辙机、无源应答器等设备。

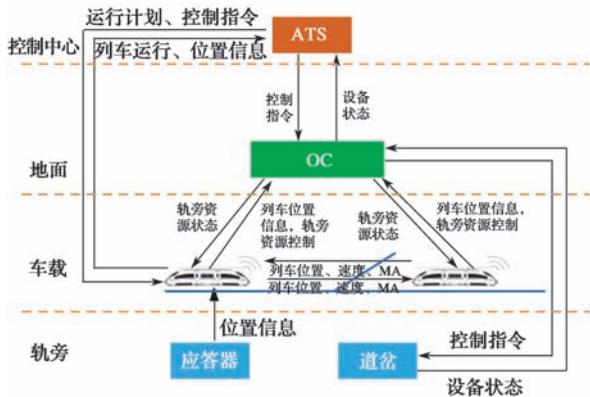


图2 列车自主运行控制系统架构
Fig. 2 Architecture of TACS

2.2 轨旁线路资源分散管理

TACS 删除了通过传统进路手段对进路内线路资源点集中管理的方式。系统基于对线路资源分散管理的理念^[5-7],对轨旁线路资源的颗粒度进行更加细化处理,将线路上的道岔、站台区段及保护区段都视为线路资源点,每一个资源点被视为最小的管理单元。

TACS 中,控制中心ATS系统基于运行计划向车载VOBC发送计划运行路径信息;车载VOBC基于接收到的计划运行路径信息,识别出列车运行前方一定距离范围内(可配置)线路资源点,依次向OC申请该范围的线路资源;OC系统进行线路资源冲突性

安全校验,校验条件通过后,将该线路资源分配给申请列车,确保同一资源同一时刻只能供一列列车占有。

车载VOBC一旦获取到资源,即拥有对该资源的占有和控制权,列车判断使用完该资源后,及时向OC发送该资源的释放申请;OC接收到资源释放申请指令后,立即收回该列车对该资源的占有和控制权,同时可将该资源重新分配给下一申请列车,从而最大限度地提高线路资源的利用率。

2.3 列车侧冲和侵限防护

传统CBTC系统中,列车侧冲和侵限防护是由CI系统通过进路与进路间敌对、保护区段与相邻保护区段间敌对、保护区段与进路间敌对的防护处理逻辑来保证的;同时ZC接收CI发送的进路和保护区段的状态信息,实时更新列车的移动授权(movement authority, MA),车载VOBC根据ZC发送的移动授权计算列车的速度控制曲线,防止列车发生侧冲的风险。

在TACS中,对轨旁线路资源的颗粒度进行更加细化处理;同时,为保证列车间的运行安全,避免在线列车发生追尾或侧冲的风险,线路上所有的道岔都被设置为单动道岔^[7],并且为每一道岔资源计算安全防护区,同时将道岔资源点都设置为独占属性,以确保同一资源同一时刻只能供一列列车占有。

当车载VOBC获取到某资源后,为列车计算的MA就可以进入该资源防护区;若车载VOBC未获取到该资源,那么为列车计算的MA就不能进入该资源点防护区。

若两相邻道岔资源点防护区域间存在重叠区域,如图3中渡线道岔1与道岔3防护区内存在重叠防护区域时,可根据道岔间拓扑链接结构按需实时调整,将重叠防护区划配至相应的道岔防护区内,列车基于资源点的独占属性来实时调整列车的MA终点和列车速度控制曲线,以防止列车间发生侧冲风险,从而保证列车的运行安全。

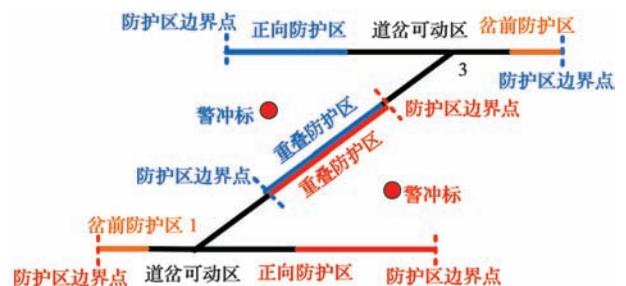


图3 道岔防护区域分段示意图
Fig. 3 Sectional diagram of switch protection area

2.4 列车与 OC 通信

TACS 和传统 CBTC 系统不同，其车载 VOBC 基于轨旁线路资源状态信息自主计算移动授权，OC 与 OC 之间不需要互传行车许可信息，也没有 OC 移交接管场景。车载 VOBC 除与列车车身所处的 OC 实时通信外，还可根据 ATS 下发的运行计划自主计算列车安全车头位置向前延伸一定长度（可配置，以满足列车的安全运行和行车效率因素要求）后的终点位置，当列车从该位置移至下一相邻 OC 的边界点时，开始主动与下一 OC 注册申请链接，以获得线路上车头前安全距离范围内线路轨旁资源的状态信息和障碍物信息，依此计算列车的 MA。图 4 示出列车与 OC 通信示意。

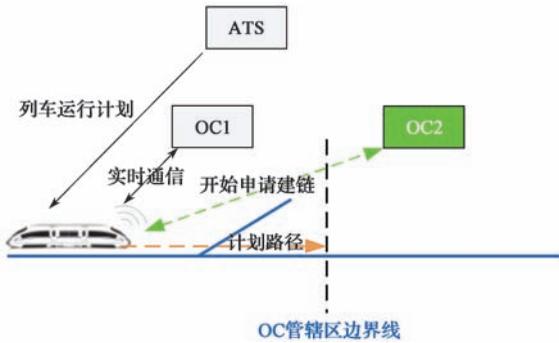


图 4 列车与 OC 通信示意

Fig. 4 Schematic diagram of communication among train and OCs

2.5 列车与相邻列车通信

TACS 中，车 - 车间直接通信并非为在线所有列车全部通信。TACS 在保证列车运行安全的前提下，最大限度地减少系统间通信传输的数据量，减小系统间的通信压力，因此车载 VOBC 在基于中心 ATS 下发的运行计划自主地向 OC 申请规划运行路径范围内的线路资源时，列车会与存在资源冲突的相邻列车实时通信、交互信息，以获取相邻列车的位置、速度、方向及 MA 等信息，并自主计算 MA 和控车速度曲线，确保列车自身的运行安全。图 5 示出列车与相邻列车通信示意。

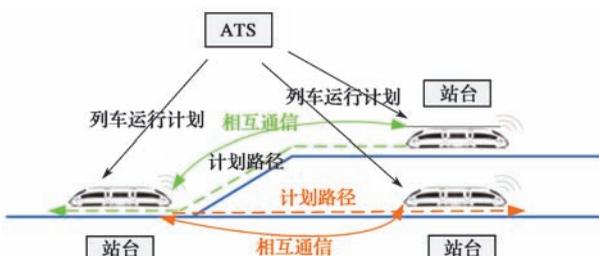


图 5 列车与相邻列车通信示意

Fig. 5 Schematic diagram of communication among train and its adjacent trains

2.6 列车自主运行

ATS 将计划运行路径信息提前下发至 TACS 列车，车载 VOBC 自主规划运行路径，并向 OC 获取规划运行路径内的线路资源；在获得路径内资源点的占有权和控制权后，车载 VOBC 根据需求可向 OC 输出对该资源的操控命令，并实时接收 OC 发送的资源设备状态信息，同时会与存在资源冲突的相邻列车实时通信，交互列车运行状态信息；基于以上信息，车载 VOBC 自主计算出 MA（图 6）和控车防护速度曲线，控制列车在安全防护速度曲线下运行。当列车实际运行与运行计划出现偏差时，车载 VOBC 依据 ATS 下发的运行变更计划或人工调整指令，实时自主地申请获取或释放计划路径内的线路资源，实时调整列车运行路径、站停时间及区间运行等级等参数，以控制列车牵引 / 制动指令以及级位等信息的输出时机，重新计算列车的 MA，从而控制列车按新计划行车（图 7）。

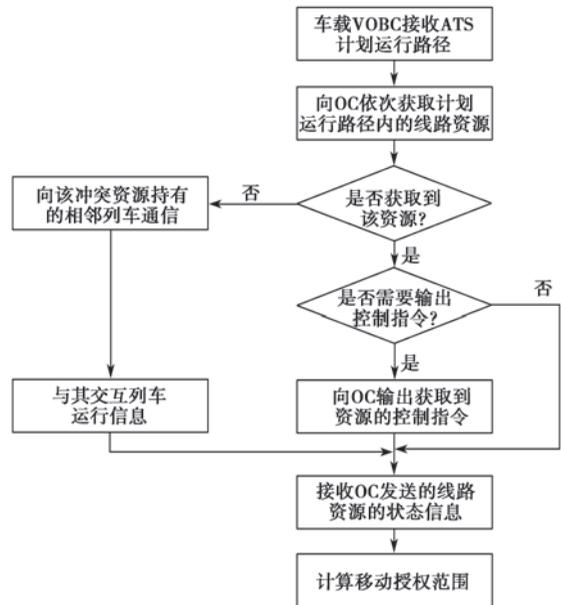


图 6 列车自主计算 MA 时序示意图

Fig. 6 Sequence diagram of train autonomous computing MA

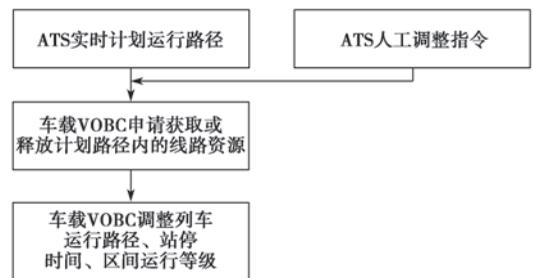


图 7 列车自主运行调整时序示意

Fig. 7 Sequence diagram of train autonomous operation adjustment

2.7 列车降级管理

传统CBTC系统，由于轨旁设置信号机、次级列车占用检测设备、有源应答器等设备，系统可设置点式级别控制模式与联锁级别控制模式^[12]。当列车因与轨旁列控设备通信发生故障而降级后，其依据从有源应答器接收的报文信息获得点式MA信息，可继续在有效MA范围内安全运行。当车载VOBC应答器接收设备或应答器本身故障时，由CI设备实现进路的人工设置，司机将地面信号显示作为行车凭证，人工驾驶列车运行。

TACS原则上不在轨旁线路上布置信号机及有源应答器等设备，因此系统不以传统的点式级别控制模式与联锁级别控制模式作为后备控制模式。TACS列车以车-车间主动通信为基础，通过列车与地面OC间实时交互线路资源及列车位置信息。OC接收所管辖区内的所有受控通信列车的位置信息，实时维持通信链路，当OC判断与受控列车非正常注销通信中断或者接收到车载VOBC发送的列车完整性丢失、障碍物/脱轨故障信息有效时，为该故障列车自动触发创建具有安全长度的防护区；同时OC将创建的防护区信息发送至管辖内的所有受控列车。正常通信列车车载VOBC接收到防护区信息后，列车在计算移动授权时将该信息视为不能逾越的障碍点，将通信列车与降级故障列车进行物理隔离，以确保列车运行安全（图8）。

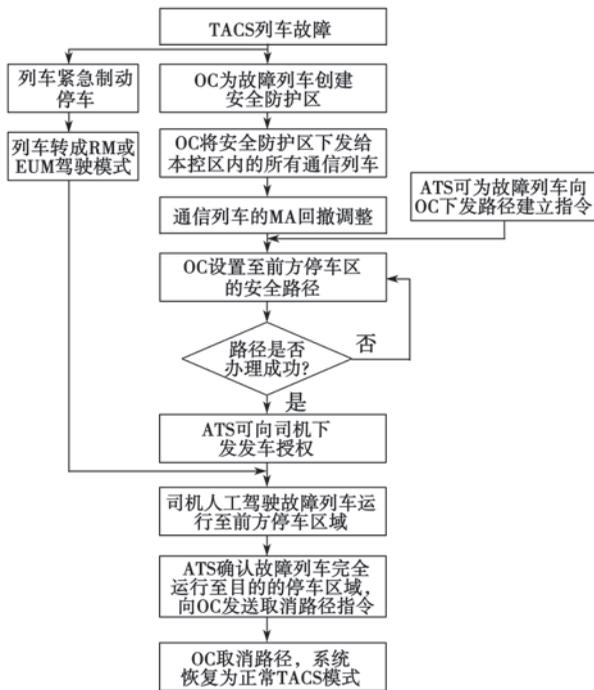


图8 列车故障降级管理时序示意图

Fig. 8 Sequence diagram of train fault degradation management

此外，OC提供降级列车的路径设置功能，可为故障降级列车设置以列车为起点至前方目的停车区域的路径，集中管理路径内的线路资源。当列车故障触发紧急制动停车后，列车降级为限制人工驾驶（RM）或紧急非限制人工驾驶（EUM）模式，由中心调度员为故障列车向OC下发至前方站台或目的正线存车线的路径建立指令；OC进行路径建立条件检查，当检查条件通过后（此路径具体检查逻辑不同于固定闭塞下的联锁进路检查条件，本文不再详述），路径建立成功，中心调度员可向故障列车司机下发发车授权；故障列车司机可结合障碍物主动识别技术，人工驾驶列车在ATP固定的低速防护下（降级列车为RM模式时）运行至前方站台或目的正线存车线。

OC为故障列车设置路径，正常通信TACS列车不能申请获取到该路径内的线路资源，所以为列车计算的行车许可也不能延伸进入该路径范围内；当故障列车运行到达目的停车区域且经中心调度员人工确认后，可以下发取消路径指令，OC取消为故障列车设置的路径，系统立即恢复为TACS控制模式。

3 TACS典型核心功能

TACS是以列车为中心，以车-车、车-地间协作通信为基础，实现列车运行方式由自动化向自主化转变，其典型核心功能主要包括列车自主路径、自主防护及自主运行调整等。

3.1 列车自主路径

传统CBTC系统，由ATS根据运行计划和列车位置向CI下发进路建立指令，由CI判断进路建立条件，输出进路内的道岔控制指令及时机。CI检查进路建立条件，全部满足后，锁闭进路，并将进路锁闭状态信息实时发送给ZC设备，由ZC为列车计算移动授权。

TACS列车自主计算安全路径。TACS列车车载VOBC提前接收ATS下发的计划运行路径信息，主动向OC提取计划运行路径范围内的线路资源，列车基于线路资源的获取状态自主计算安全运行路径。通常情况下，若列车获得某资源，为列车计算的安全运行路径终点就可以越过该资源点防护区，延伸至下一未获得的线路资源点防护区边界，再回撤一定的安全防护距离，从而周期地计算出列车的安全运行路径范围。

3.2 列车自主防护

传统 CBTC 系统通过轨旁 CI、ZC 设备与车载 VOBC 协同控制列车安全运行。其由轨旁 CI 系统设置进路内的联锁逻辑检查、进路与进路间的敌对联锁逻辑检查,以进行列车间的安全间隔防护;同时,轨旁 ZC 接收 CI 发送的进路状态和轨旁设备状态等信息,为受控列车计算 MA;受控列车车载 VOBC 根据 ZC 为其计算的 MA 计算列车安全防护速度曲线,以确保列车间的安全间隔防护。

由于轨旁不设置信号机、次级列车占用检测设备,因此 TACS 不能通过设置常规、传统进路方式来进行列车运行的安全防护,其将进路演变为行车空间内的路径资源。

列车基于自主计算的安全路径,识别该安全路径范围内的所有障碍物(包括前车),锁定需要通信的相邻目标列车,并主动与目标列车实时通信交互信息,以获取目标列车的位置、速度及方向等信息。列车基于安全路径、从 OC 接收到的轨旁设备状态信息、列车位置信息以及通过车-车间直接通信方式获取到的相邻列车信息,自主计算移动授权和控车防护速度曲线,以确保列车间的安全间隔防护。

3.3 列车自主运行调整

传统 CBTC 系统,若列车实际运行的路径和运行时间与运行计划出现偏差时,由 ATS 根据预先设置的调整策略(如先到先服务、时刻表优先)变更计划,可采取两种处理方式:

(1) 调整运行计划或者人工设定目的地,并下发给目标列车。

(2) 采用 ATS 的冲突处理策略。对于后行列车,当列车占压进路的触发区段时,可限制为列车触发办理进路的时机;同时列车根据调整的运行计划,调整列车的站停时间、区间运行等级等参数。

而 TACS,若列车在实际运行过程中出现晚点或因列车故障导致与计划运行时刻表出现偏差时,目标列车既可实时接收 ATS 自动下发的更新运行计划,也可以接收中心调度员人工下发的调整站停时间、区间运行等级等指令。列车根据更新计划或调整指令自主调整列车运行路径,自主申请或释放线路资源,以控制列车输出牵引、惰行、制动指令的大小和时机,从而实现列车的自主运行调整。

4 TACS 特点

4.1 系统架构优化,更安全可靠

TACS 在传统的 CBTC 系统的“车-地-车”架

构基础上进行了优化,车载 VOBC 集成了原地面的 CI 和 ZC 的核心功能以及 ATS 的部分功能,地面仅保留与现场设备接口的 OC 设备;同时,车载 VOBC 设备与车辆网络、牵引、制动系统深度融合,大大降低了系统间接口的复杂度并减少了交互信息量,优化了通信链路,有效减少了系统间列控信息通信传输时延,提高了系统控制精度,使列车在安全、可靠、智能方面有了明显提升。

4.2 线路资源利用率高

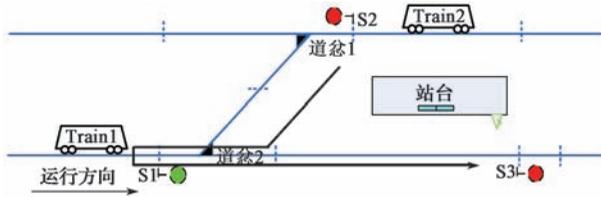
TACS 基于运行计划对线路上的资源点进行有序分配和释放管理,替代传统 CBTC 系统通过进路的手段对进路内的线路资源点集中管理;同时,将资源点都设置为独占属性,列车使用完某资源后立马释放,系统立马可以将该资源分配给下一申请列车。因此,可以在同等线路配置条件下,尽量减少每一线路资源被每一列车占用的时间,从而大幅提升线路资源利用效率,也有利于缩短列车运行间隔,提高列车的旅行速度。

4.3 提升列车追踪折返效率

传统 CBTC 系统中,通过传统进路的方式对进路内的线路资源统一集中分配管理,也是通过进路间侵限防护检查来防止列车间的侧冲、侵限风险;同时,传统 CBTC 系统一般将物理上关联渡线道岔设置为双动道岔(只能同时操纵至定位或同时操纵至反位)。而 TACS 对线路资源进行分散管理,同时将所有的道岔设置为单动道岔;列车获取某道岔资源且判断通过该道岔防护区后,可立马释放该道岔资源,因此,可大大缩短折返间隔时间,提升列车的折返效率^[13]。

下面通过 TACS 与传统 CBTC 系统下的列车追踪进行站后折返作业时的场景来对比描述。如图 9 所示(线路上的信号机、计轴点都是虚拟设备),TACS 下列车 Train1 和 Train2 按照图中黑色路径进行站台折返作业,TACS 将所有的道岔设置为单动道岔。先行列车 Train1 从接车站台进行站后折返作业,Train1 获取到线路上期望位置的道岔 1 和道岔 2 资源后,计算的 MA 终点延伸至折返轨,列车出站发车前行。当列车运行出清道岔 1 防护区域后,立即释放道岔 1 资源。OC 系统可接受后行列车 Train2 对道岔 1 位置的申请,立即将道岔 1 分配给 Train2,OC 输出相应的道岔控制指令,将道岔 1 操纵至反位;同时,为防止列车间侧冲风险,根据 2.3 节介绍的列车侧冲防护原理,Train2 自主计算的 MA 终点不能

越过道岔 1 和道岔 2 之间的重叠防护区的边界点（相对于 Train2 的接近端），确保 Train2 不会与从折返轨折出运行的列车 Train1 发生侧冲，在保证列车运行安全的同时又大大提高了折返效率。



注：S₁, S₂, S₃——信号机。

图 9 TACS 的站后追踪折返示意

Fig. 9 Schematic diagram of tracking and turning back after station for TACS

如图 10 所示，传统 CBTC 系统下列车 Train1 和 Train2 按照图中黑色路径进行站后折返作业，系统为前行列车 Train1 办理 S₂-S₁ 的折入进路，将道岔 1/道岔 2 操纵至反位，列车 Train1 的 MA 终点延伸至折返轨后，列车发车前行。当列车运行至折返轨完全出清道岔 1 和道岔 2，道岔 1 和道岔 2 才能彻底解锁。但是为规避折返作业时列车憋车的场景，传统 CBTC 系统不允许追踪办理折返进路，所以只能等待，为列车 Train1 继续办理 S₁-S₃ 的折出进路；将道岔 1/道岔 2 重新操纵至定位，Train1 折出运行完成、出清道岔 2 后，系统才能彻底释放解锁道岔 1/道岔 2，此时才能为后行列车 Train2 办理 S₂-S₁ 的折入进路；又将道岔 1/道岔 2 重新操纵至反位，依次反复进行折返作业。显然，传统 CBTC 系统列车折返效率要远远低于 TACS 系统列车的。

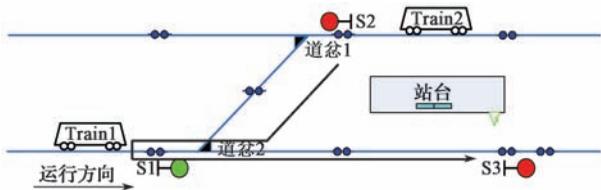


图 10 传统 CBTC 系统的站台追踪折返示意图

Fig. 10 Schematic diagram of tracking and turning back after station for traditional CBTC system

4.4 提高系统运营组织的灵活性

传统 CBTC 系统通过进路保证列车运行安全；同时由于进路的限制，对于双车对向运行作业，通过敌对进路冲突检查来进行防护。进路冲突时，无法成功办理进路，列车只能在允许对向运行的特定范围内对向运行，既无法满足在特殊需求下的对向运行，

也无法满足突发或异常场景的更高效的应对（如救援列车的高效安全运行），运行灵活性较低。

TACS 系统对线路资源的更精细化管理，可为运营提供更加灵活和多样化的运输组织方案。例如，系统可以为故障列车设置以列车为起点、任意方向的至前方目的停车区的路径，以提高应急救援处理效率；系统支持列车在线路区间任意点折返换端运行、列车以无人驾驶模式对向运行等场景。

4.5 大大提高了系统可用性

传统 CBTC 系统中，ZC 对控制区域内的列车进行集中管理，收集所有列车的位置信息及控制区域内的进路状态，为每一列车计算移动授权；当 ZC 发生故障时，整个控制区域内的 CBTC 列车都会受到影响。

TACS 相对于传统 CBTC 信号系统是一个分布式交互控制系统，列车自主运行时，仅需无线网络且 OC 设备无故障即可。单列车故障时，并不会影响其他正常 TACS 列车正常运行，对运营影响范围小且能快速恢复，可用性更高。

4.6 降低项目成本

与传统 CBTC 系统相比，TACS 简化了系统架构，轨旁线路上删除了有源应答器和大部分计轴设备和信号机设备，车站去除了 ZC 和 CI 设备；同时车载 VOBC 系统与车辆电气系统深度融合，车载信号系统与车辆间的非安全硬线/继电器通过列车控制与监测系统 (train control and monitoring system, TCMS) 实现，也优化了各子系统间接口，大大降低了系统项目的建设、运营及维护成本，系统的项目工程施工和调试更容易，施工周期也大大缩短。

依据 CBTC 工程项目中设备成本估算，TACS 相比于传统 CBTC 系统工程项目，信号设备成本可减少 20%，项目建设、运营及维护成本可降低 20%~30%，项目工程施工、调试周期可缩短 20%~30%。

4.7 有利于旧线改造

TACS 地面系统仅保留了 OC、ATS 系统设备，轨旁线路仅设置转辙机和无源应答器，列车运行路径、移动授权以及列车的控车速度曲线等核心功能都被移植且集成至车上，轨旁设备简单，大大降低系统间接口的复杂度和工程调试难度。这些特征非常有利于旧线列车控制系统升级改造，同时也有利于新旧系统倒切时系统的快速恢复，系统切换的安全风险大大降低。

5 结语

TACS 优化了传统 CBTC 系统的“车-地-车”系统架构,充分利用 LTE-M 这一安全高速的信息传输平台,使列车间可以直接通信交互信息,并将系统的列车控制主体转移到列车车载控制器上,实现了列车的自主运行。同时,通过对线路资源的精细化管理,TACS 实现了线路资源利用最大化,大大缩短了列车追踪折返间隔时间,提升了列车出库入库能力,提高了线路的运能运量,系统的运输组织更灵活高效。系统也减少了轨旁线路的信号设备数量,大大降低了项目的建设和维护成本。

未来,TACS 将朝着更安全、高效、灵活、经济的方向发展:

(1) 在精确定位的基础上,通过对道岔等线路资源的精细化管理,以列车车载设备自主控制方式实现高效能的列车控制,进一步缩短列车追踪、折返间隔,以提升线路运能。

(2) 以全自动无人驾驶 FAO 为核心的智能轨道交通将包含智能调度、智能运维等功能,以及智能化车站和智能化车场,使智能轨道交通发展到一个新的高度;为保障列车安全、快捷运营,TACS 在设备无故障条件下以 FAO 模式运行,有效提升了线路运能,同时 TACS 为“故障-安全运行”的系统设计理念提供了实现手段。

(3) 随着人工智能、大数据、云平台等各种新技术的发展和计算机运行能力的提升,列车控制设备的进一步整合和简化也将成为一个趋势,如轨旁设备的整合、车载信号设备与车辆电气系统设备的整合等,列控系统的架构和接口将更为简单和合理。

参考文献:

[1] Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee of the IEEE Vehicular Technology Society. IEEE Standard for Communications-Based Train Control Performance and Functional Requirements:IEEE 1474.1-2004[S/OL]. IEEE, 2005-02-25[2020-09-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9643>.

[2] 姜坚华. 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, 2020(3): 6-9.

JIANG J H. Development Trend of Urban Rail Transit Train Control System[J]. Urban Mass Transit, 2020(3): 6-9.

[3] 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.

[4] 郜春海, 张强, 孙军国. 城市轨道交通列控系统:201710963594. X[P]. 2019-04-23.

[5] 汪小勇. 城市轨道交通列车自主运行系统探讨[J]. 中国铁路, 2020(9): 77-81.

WANG X Y. Discussion on Train Autonomous Circumambulate System Based on Vehicle-to-Vehicle Communication in Urban Rail Transit[J]. Chinese Railways, 2020(9): 77-81.

[6] 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 Q P, WU H, CHEN L J. Train Autonomous Circumambulate System Based on Train to Train Communication[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(7): 46-49

[7] 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(Z2): 21-23.

DU J X. Control of Train-to-Train Communication Signal System in Urban Rail Transit [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(Z2): 21-23.

[8] 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 H K, REN Y. Design of the Object Controller for Vehicle-to-vehicle CBTC System [J]. Control and Information Technology, 2018(3): 52-55.

[9] 代继龙, 李晓刚, 李兆龄, 等. 新一代 CBTC 系统方案研究与关键技术探索[J]. 铁路通信信号工程技术, 2016, 13(6): 41-44.

[10] 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.

[11] 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 H, SUN J G, ZHANG Q, et al. A New Generation of CBTC System without CI and ZC[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(4):91-95.

[12] 凌祝军. CBTC 系统中的联锁技术研究[J]. 铁道通信信号, 2009, 45(9):12-14.

LING Z J. Study on Interlocking Technology in CBTC System[J]. Railway Signalling & Communication, 2009, 45(9):12-14.

[13] 郑艺, 张韦, 沈涛, 等. 基于车-车通信的 CBTC 系统自动折返方案设计[J]. 控制与信息技术, 2019(5): 68-71.

ZHENG Y, ZHANG W, SHEN T, et al. Automatic Turn-back Scheme for CBTC System Based on Train to Train Communication [J]. Control and Information Technology, 2019(5): 68-71.