

以列车为中心的自主控制系统的列车工作模式*

冯浩楠^{1,2} 郑泽熙^{1,2} 白广争^{1,2**} 杜萌³ 李永康⁴

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 100081, 北京; 2. 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心, 100081, 北京; 3. 北京华铁信息技术有限公司, 100081, 北京; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所, 100081, 北京//第一作者, 副研究员)

摘要 基于全自动运行系统存在的问题,分析了以列车为中心的自主控制系统的技术特点及优势,阐述了以列车为中心的自主控制系统各列车工作模式及其转换规则。针对列车虚拟连挂场景,详细分析了列车虚拟连挂和虚拟解挂的需求、编队过程,以及安全控制的关键技术。

关键词 城市轨道交通; 列车运行控制系统; 以列车为中心的自主控制系统; 列车工作模式

中图分类号 U284.48+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.037

Train Operation Mode of Train-centric Autonomous Control System

FENG Haonan, ZHENG Zexi, BAI Guangzheng, DU Meng, LI Yongkang

Abstract Based on the problems existing in fully automatic operation system, the technical characteristics and advantages of the train-centric autonomous control system are analyzed, and the working modes of each train in the control system and their conversion rules are described. For virtual linkage scenario, the requirements and formation process of virtual coupling and uncoupling, and the key technology of safety control are analyzed in detail.

Key words urban rail transit; train operation control system; train-centric autonomous control system; train operation mode

First-author's address Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., 100081, Beijing, China

在采用车-地协同控制方式的列车运行控制系统(以下简为“列控系统”)中,最新推出的全自动运行(FAO)系统存在以下问题^[1-2]:

1) 地面控制系统安装成本较高,维护和管理程序繁琐,给运营带来了负担。

2) 列控系统的安全运行很大程度上依赖地面控制系统。列控系统与地面控制系统形成的车-地-车三角形循环控制链路较长,使得列车的运行间隔难以缩短。

为克服现有基于地面无线通信列控系统的局限性,进一步提高列车运行控制效率、缩短列车运行间隔,列控系统控制方式正在由车-地协同控制向以列车为中心的控制转变^[3]。

2014年,阿尔斯通公司基于车-车通信理念研发了下一代CBTC(基于通信的列车控制)系统的解决方案——Urbalis Fluence系统。其可将列车运行间隔缩短到60s,已在法国的里尔地铁使用。该系统应用的虚拟连挂功能可在列车静止状态或运行中实现列车的连接或断开,反映了下一代列控系统以列车为中心的自主控制之重要特点。具有该功能的列车不需要物理连接器,就能缩短列车运行间隔、实现运输量最大化^[4]。在我国,TACS(以列车为中心的自主控制系统)正在成为城市轨道交通领域重点发展趋势之一^[5-6]。

本文重点研究了TACS中的列车工作模式,并与FAO系统的列车工作模式进行比较。详细介绍新增虚拟连挂场景的系统控制需求及转换过程,为以TACS的工程设计和应用提供参考借鉴。

1 TACS架构及技术特点

1.1 系统架构

TACS分为地面子系统和车载子系统两部分,其架构如图1所示。地面子系统主要包括RM(资

* 中国铁道科学研究院集团有限公司重点研究项目(2020HT08)

** 通信作者

源管理器)和 OC(对象控制器)。其中:OC 负责控制轨旁资源;RM 负责管理区段、道岔和 PSD(屏蔽门)等共享资源,不决定轨旁资源是否被拥有和控制。车载子系统包括 ATO(列车自动运行)子系统和 ATP(列车自动防护)子系统。在列控系统中,ATP 子系统负责执行安全功能,ATO 子系统负责执行非安全功能。

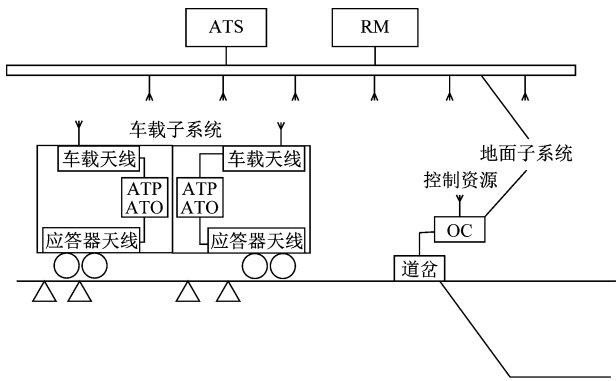


图 1 TACS 架构

Fig. 1 Architecture of TACS

1.2 与 FAO 系统比较

FAO 系统以“地面控制和硬件设备”为中心,其中地面控制系统在 FAO 系统中起到关键控制作用,硬件设备冗杂庞大。与之不同的是,以列车为中心的自主控制系统以“车载控制系统和系统软件”为中心,其中车载控制系统在 TACS 中起到自主控制作用,更依赖软件来实现复杂逻辑功能。TACS 技术特点见表 1。

表 1 TACS 技术特点

Tab.1 Technical characteristics of TACS

项目	技术特点
功能	新增虚拟连挂场景
模式	新增列控模式:SM(被动模式)、MDM(主控模式)
设备	取消了地面的计算机联锁子系统和 ZC(区域控制器)子系统,新增了 OC 和 RM
接口	取消了列控系统同计算机联锁系统及 ZC 的接口,增加列控系统同 OC 和资源控制器之间的接口

2 列车工作模式

根据工作模式和运行需求,TACS 的工作模式有 ADM(自动驾驶模式)、APM(自主防护模式)、FMM(全手动模式)、OFF(关闭)模式、DM(车辆段模式)、SM(被动模式)、MDM(主控模式)、SBM(待机模式)。

2.1 ADM

自动驾驶模式是在没有总控制室或乘务员(司机和操作人员)等人为干预的情况下,由列控系统执行 ATO 功能和 ATP 功能的运行模式。自动驾驶模式是运营中最常见的列车运行模式。此模式下,列控系统进行如下识别、判断和控制:

- 1) 列车识别出自己的位置和前方的情况。
- 2) 列车根据识别的信息来判断是否在识别的进路行驶。
- 3) 列车控制的功能包括控制行驶路线和方向,以及控制列车的牵引和制动等。
- 4) 列车到站台时,自动开门和关门。
- 5) 列车在指定位置自动折返。

在正常运营场景中,列车从 ATS 系统接收运营计划,并根据运营计划的路线及时间表运行。在异常运营场景中,列车需识别运行过程中发生的各种事故或故障等异常情况,尽量实现运营计划。

2.2 DM

当受控列车进入车辆段时,工作模式为 DM。除了在车辆段内收到特定的速度限制外,其余与 ADM 相同。DM 不是钥匙开关切换,而是由 TACS 软件自动判断实现。

2.3 SBM

它是自动工作模式的一个子模式。为降低列车的电力消耗,列车在任何位置待机都能切换至待机模式。在 SBM 下,列控系统保持活跃状态,继续监控列车状态和故障情况。

2.4 APM

在 APM 下,列车失去自动驾驶功能,仅保留列车自动防护功能。列控系统被激活。首先,识别列车前方的情况;然后,根据识别结果来确定列车的限速和目标停车点,并显示在司机室的 MMI(人机界面)中,由司机负责驾驶列车。当列车运行速度超过限速时,列控系统会自动发出制动指令,保证列车运行不超速。当列车进站停车后,由司机手动发出开关门指令。

2.5 SM

MDM 也是自动工作模式的 1 个子模式。当目标列车的列控系统与其前车建立虚拟连挂场景时,目标列车的工作模式切换为 SM。在该模式下,列控系统虽仍基于自身车速、加速度和位置等信息对其列车运行速度曲线进行连续计算,但并不按列车运行速度计算值来给牵引系统和制动系统发出相

应指令,而是基于与前车的列车间隔及前车加速度进行自主补偿控制,以保持与前车的安全距离。

2.6 MDM

MDM 也是自动工作模式的 1 个子模式。当目标列车与后车建立虚拟连挂场景时,列车的工作模式切换为 MDM。在此模式下,目标列车与 RM 通信,以保留区段、道岔和 PSD(屏蔽门)等共享资源。虚拟连挂编队中的头车需考虑其编队中后续 SM 列车的长度。

2.7 FMM

当目标列车列控设备同其他列车的通信,以及同 ATS 的通信都中断时,列车工作模式切换为 FMM 模式。此时,没有列控系统的保护功能。ATS 控制室调度员负责确保 FMM 模式的列车按照操作程序安全运行,调度员人工为故障列车排列进路。司机须遵循严格的程序并获得调度的许可,遵循人工引导列车驶出自主列控系统运行的区间。FMM 模式下的列车将从 RM 获得的所有轨旁资源都将释放。以 ADM 模式运行的列车无法进入 FMM 模式列车所在区域。

2.8 OFF 模式

当列控系统防护功能终止运行时,列车进入 OFF 模式。在此模式下,列车从 RM 中删除了除列车占用位置的信息外包括移动权限在内的所有资源。列控系统仍监控自身的状态,保持同 RM、其他列车及 ATS 子系统的通信。

3 列车工作模式转换规则

在 TACS 的 8 种列车工作模式中,ADM、APM、FMM、OFF 4 种模式可通过钥匙开关来控制转换,其余 4 模式则由 TACS 的软件来实现。

在转换条件 C 的作用下,列车工作模式由 M_s 转换为 M_r 。相应的工作模式转换表示为:

$$M_r = C(K,A,L,S,M_s) \tag{1}$$

式中:

M_r ——转换后列车工作模式;

M_s ——转换前的列车工作模式。

C ——转换条件,与钥匙状态 K 、移动授权状态 A 、列车位置 L 、与 RM 的连接状态 S ,以及 M_s 等有关。具体如表 2 所示。

4 列车虚拟连挂和解挂

与 FAO 系统功能相比,以列车为中心的自主控

制系统新增了列车虚拟连挂场景功能,且工作模式相应增加了 MDM 和 SM。在虚拟连挂场景中,列车通过列控系统进行虚拟连挂,形成虚拟编队;在提出虚拟解挂请求后,解散虚拟编队。

4.1 虚拟连挂和虚拟解挂的关键技术

1) 确定列车长度。虚拟连挂车队的头车接收后面列车长度,确定整个虚拟编队的列车长度。

2) 确定列车加速度。①后车的列控系统接收前车的位置和速度变化信息,并据此计算与前车的最小安全距离(MSD);②后车的列控系统须实时监控自身列车状态,以控制后车与前车的间隔距离不小于 MSD,并在必要时向后车发出减速命令;③如果后车与前车的距离大于 MSD,则后车列控系统须发出加速命令,以补偿前后车距离。④当列车出现逻辑连接丢失、前后车距离意外缩小到小于 MSD 或虚拟连接意外解除三种情况之一时,列控系统须立即实施紧急制动;⑤虚拟编队中所有列车的列控系统均共享制动输入结果,并提供给其 ATS 子系统。

3) 虚连接请求响应。①后车列控系统须根据 ATS 子系统的列车时刻表,与前车进行虚拟连接;②后车 MA(移动授权)范围的终点为前车的最小安全后端;③虚拟编队中,后车的列控系统将自身列车最大运行速度、最大加速度及最大制动加速度等性能参数边界值调整为与前车同步统一;④虚拟编队长度是指从头车最大安全前端到尾车的最小安全后端的整个编队长度。需在列车长度基础上,考虑运动条件下所有列车的安全距离来确定;⑤虚拟编队中,如后车切换至 SM,则其加速度控制须根据前车的加速度来确定;⑥虚拟编队中,后车须连续计算本车的安全速度控制曲线,准备随时断开虚拟连接;⑦虚拟编队中,后车在计算与前车的 MSD 时,须补偿允许加速度。

4) 响应虚拟解挂请求。①后车列控系统须根据 ATS 列车时间表与前车进行虚拟解挂;②虚拟编队中的后车与前队的距离须增加到允许的安全距离时,才可请求虚拟解挂;③已虚拟解挂的虚拟编队,头车须重新计算虚拟编队的列车长度;④已释放虚拟连接的列车,须解除虚拟连接时受限的列车性能限制。

4.2 虚拟编队的业务过程

虚拟编队的业务过程包括虚拟连挂触发、虚拟连挂和虚拟解挂。

表 2 以列车为中心的自主控制系统列车工作模式转换规则

Tab. 2 Train operation mode conversion rules of train-centric autonomous control system

C	K,是否为物理钥匙	A,是否为移动授权	L,列车能否定位	S,是否与RM连接	M _s	M _f	说明
C1	是	是	是	否	其他模式	FMM	
C2	是	是	是	否	FMM	APM	司机控车,车速限速为 25 km/h
C3	否	是	是	是	ADM	DM	进入车辆段后自动切换
C4	否	是	是	是	DM	ADM	自动切换
C5	否	是	是	是	DM	SBM	在车辆段收到 ATS 睡眠命令时自动切换
C6	是	是	是	是	ADM	APM	插入钥匙后模式转换
C7	是	是	是	是	APM	ADM	司机拔出钥匙,将操作模式开关切换至 ADM
C8	否	是	是	是	ADM	SBM	收到 ATS 睡眠命令时自动切换
C9	否	是	是	是	ADM	SM	列车收到 ATS 的虚拟连挂触发命令,到特定轨道段切换为 SM
C10	否	是	是	是	ADM	MDM	列车收到 ATS 的虚拟连挂触发命令,到特定轨道段切换为 MDM
C11	否	否	是	是	SBM	ADM	收到 ATS 唤醒指令时自动切换
C12	否	否	是	是	SBM	DM	车辆段内收到 ATS 唤醒命令时自动切换
C13	否	——	——	否	SM	ADM	收到 ATS 发送的虚拟解挂命令,列车在特定轨道段切换为 ADM
C14	否	是	是	是	MDM	ADM	收到 ATS 发送的虚拟解挂命令,列车到特定轨道段切换为 MDM
C15	否	否	是	否	其余模式	OFF 模式	司机关闭列车运行控制系统
C16	否	否	是	否	OFF 模式	其余模式	启动时从 FMM 模式进行列车位置初始化

注:——表示不关注 2 个变量取值。

1) 虚拟连挂触发的过程。列车之间的虚拟编队预先存储在 ATS 子系统的列车时刻表中。列车按照运营时间表,在需进行虚拟编队的时刻触发虚拟连挂。具体过程为:①检查列车的牵引和制动性能是否正常。②检查参与虚拟编队的各车通信设备和通信状况是否正常。③后列车向前列车发送虚拟连挂请求消息,前列车发送确认消息回应。对于前列车,列车的性能参数统一为 1 个较低的值,以便前列车在虚拟编队行进时以相同的性能运行。④后列车接近前列车后,向前列车发送虚拟连挂锁定请求消息,前列车向后列车回复虚拟连挂锁定确认消息。

2) 虚拟连挂的过程:①当前列车的虚拟连挂被锁定时,前列车切换为 MDM 模式,后列车切换为 SM 模式。②前列车更新列车长度,虚拟编队长度应包括本列车长度和后列车长度。③前列车通过被授权,实现对后列车的所需资源的控制。前列车对 RM 进行资源预留和释放,后列车不再与 RM 独立通信,跟随前列车。④后列车使用从前列车接收

到的位置和速度信息,来计算本列车与前列车之间的 MSD 和控制余量,并周期性的更新 MSD 和控制余量。

3) 虚拟解挂的过程。①列车的虚拟解挂在 ATS 系统的命令中预先存储确定。在预定的列车时刻,后列车扩大与前列车的距离后,向前列车发送虚拟解挂的请求消息。②前列车收到虚拟解挂请求消息,释放前列车对后列车的控制权限。③前列车向后列车回复虚拟解挂请求确认消息,虚拟解挂后,前列车从 MDM 切换到 ADM。④后列车在收到确认消息后,虚拟解挂,从 SM 切换到 ADM。

4.3 虚拟编队的距离参数

虚拟编队的列车距离参数包括相对间距、MSD 和自由余量。三者关系如图 2 所示。

其中,相对间距是根据位置信息计算的前列车与后列车间距。MSD 的变量值 d_M 为:

$$d_M = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 \tag{2}$$

式中:

d_1 ——由测距误差导致的安全距离;

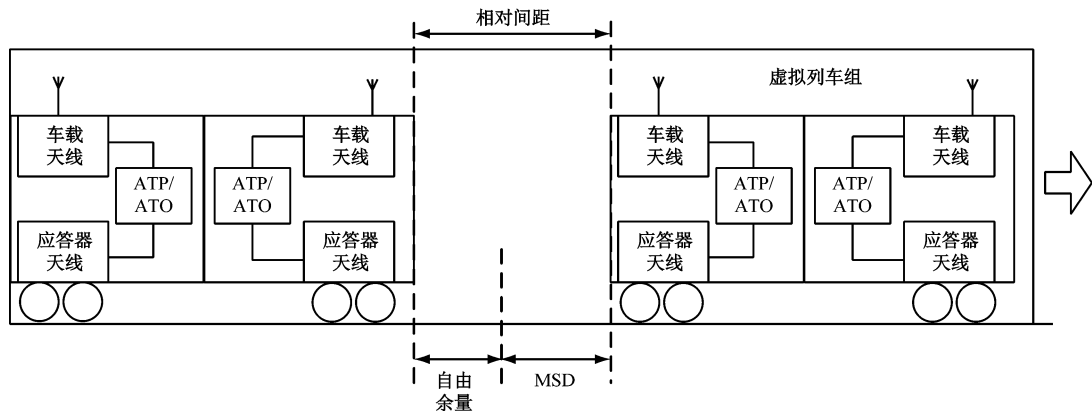


图2 虚拟编队中前后列车的相对间距、MSD 和自由余量示意图

Fig. 2 Diagram of front and rear trains relative spacing, MSD and free margin in virtual formation

d_2 ——由应答器定位误差导致的安全距离；

d_3 ——由车-车通信延时导致的安全距离；

d_4 ——列车因 ATO 子系统控制驱动延迟而导致的安全距离；

d_5 ——在故障场景下,当前列车紧急制动时,确保后列车紧急制动能安全停止的距离。

在虚拟编队中,所有列车的相对间距不能大于 MSD。相对间距减去 MSD 即可得自由余量,其表示后列车可以靠近前列车的允许距离。

在虚拟编队中,前列车和后列车在规定的时间内交互信息。应使虚拟编队中的每列列车都能及时掌握其前列车的行驶状态,并通过基于估计的 MSD 来计算自由余量,进而控制车速,实现既紧跟前列车又满足安全距离要求。

在虚拟编队中,车-车交互信息分为两类:①列车运行信息,具体包括列车速度信息、列车位置信息、列车方向、虚拟列车编队状态信息、物理连接器的状态信息等;②列车控制信息,具体包括:制动状态、制动力和制动指令、电机状态、目标速度。

当车车相对间距大于 MSD 时,后列车根据前列车的行驶信息识别前列车的速度变化情况。这可以保障后列车在列车突然刹车的情况下不会与前列车发生碰撞,以实现安全停车。

5 结语

TACS 将相关控制功能转移到车载控制子系统中,简化了地面设施,可减少硬件设施投资,并能提高可维护性。通过列车虚拟连挂和虚拟解挂,能实

现对灵活运输需求的响应。通过对各列车工作模式的阐述,以及针对虚拟编队列控系统控制流程的详细分析,为 TACS 设计及工程化提供了参考。

参考文献

- [1] 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.
JIANG Hongkuo, REN Ying. Design of the object controller for vehicle-to-vehicle CBTC system [J]. Control and Information Technology, 2018(3): 52.
- [2] 黄苏苏,冯浩楠. 基于车车通信的 CBTC 系统[J]. 城市轨道交通研究, 2021(6): 188.
HUANG Susu, FENG Haonan. CBTC system based on train-train communication[J]. Urban Mass Transit, 2021(6): 188.
- [3] 李雷,林云志,王丽丽. 基于车车通信的新型 CBTC 信号系统研究[J]. 机车电传动, 2018(4): 50.
LI Lei, LIN Yunzhi, WANG Lili. Research on a new CBTC signaling system based on train-to-train communication [J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(4): 50.
- [4] SCHUMANN T. Increase of capacity on the Shinkansen high-speed line using virtual coupling [J]. International Journal of Transport Development and Integration, 2017(4): 666.
- [5] 冯浩楠. 车车通信系统中车地控制机理分析及验证[J]. 科学技术与工程, 2020(13): 5345.
FENG Haonan. Analysis and verification of control mechanism between train and wayside equipment in CBTC system [J]. Science Technology and Engineering, 2020(13): 5345.
- [6] FENG H. Study on formal modeling and safety verification of train-to-train communication [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018: 1.

(收稿日期:2021-11-28)