

车车通信 CBTC 系统驾驶模式转换研究

郑 艺, 沈 涛, 孙 野, 孙 可

(湖南中车时代通信信号有限公司 北京分公司, 北京 100079)

摘 要: 基于车车通信的全自动无人驾驶 CBTC 系统是下一代城市轨道交通列控系统的主要发展方向, 该系统提供了多种驾驶模式。根据系统条件和运营场景的不同, 车车通信 CBTC 系统需要具备驾驶模式的建立及转换能力, 这直接影响着城轨交通系统的运营安全及效率。文章在阐述基于车车通信的全自动无人驾驶 CBTC 系统架构基础上, 对其驾驶模式及部分关键场景下的模式转换进行分析研究, 提出了相应的驾驶模式转换设计方案。该方案在符合“故障-安全”原则的基本前提下, 充分考虑了方案实施后的运营效率, 为车车通信 CBTC 系统的工程应用提供了借鉴。

关键词: 模式转换; 驾驶模式; 车车通信; CBTC 系统; 全自动无人驾驶

中图分类号: U284.48

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)02-0072-04

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.02.012

Research on the Driving Mode Conversion for CBTC System Based on Train-to-train Communication

ZHENG Yi, SHEN Tao, SUN Ye, SUN Ke

(Beijing Division, Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Beijing 100079, China)

Abstract: Unattended operation CBTC (communication based train control) system based on train-to-train communication is the main research direction of the next generation urban rail transit train control system, which provides a various of driving modes. According to different system conditions and operating scenarios, CBTC system based on train-to-train communication needs the ability to establish and transform driving modes, which directly affects the operation safety and efficiency of urban rail transit system. Based on the description of CBTC system based on train-to-train communication architecture, this paper analyzes driving modes of the system and the mode conversion under some key scenarios, and proposes a corresponding design scheme of driving mode conversion. In line with the basic premise of “fail-safe” principle, this scheme fully considers the operational efficiency after the implementation of the scheme, and provides information for future engineering application of CBTC system based on train-to-train communication.

Keywords: mode conversion; driving mode; train-to-train communication; communication based train control system; unattended operation

0 引言

随着国内城镇化建设的加速发展, 城市轨道交通线路运量持续攀升, 尤其是在通勤高峰时段, 客

运量剧增, 这对城市轨道交通的运能、运力提出更高的要求, 同时也为研发追踪间隔时间更短的列车控制系统提出了现实工程应用需求。在城轨列车控制系统的工程实践上, 目前国内外已经开始从传统的基于通信的列车控制 (communication based train control, CBTC)^[1] 向全自动无人驾驶的 CBTC 系统过渡, 并且一些列车控制系统供应商和研究机构开始对基于

收稿日期: 2020-06-18

作者简介: 郑艺 (1988—), 男, 工程师, 主要从事轨道交通列车控制系统研究工作。

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1201602)

车车通信的CBTC系统进行了相关研究和设计。其中，阿尔斯通公司采用简化CBTC地面部分的设备的方式，最先尝试搭建基于车车通信的CBTC列控系统^[2]。文献[3-6]对车车通信CBTC系统的方案设计进行了研究。文献[7]对车车通信CBTC系统的地面对象控制器设计进行了研究。文献[8]研究表明，车车通信技术有助于提升列控系统性能。文献[9]对车车通信CBTC系统的折返方案进行了初步研究。虽然当下对车车通信CBTC系统方案设计研究较多，也有一些对关键技术的讨论，但是对系统的驾驶模式研究还较为缺乏。

基于车车通信的全自动无人驾驶CBTC系统应具备多种驾驶模式，以在不同应用场景或故障条件下并在符合“故障-安全”原则基础上更好地实现提升运营效率、降低故障对运营效率影响的目标。本文设计了一套规范化的驾驶模式转换方案，并在阐述基于车车通信的全自动无人驾驶CBTC系统架构及工作原理基础上，对列车驾驶模式转换进行详细的研究分析。

1 车车通信 CBTC 系统

1.1 系统架构

基于车车通信的CBTC系统^[2]保留了列车自动监控(ATS)、目标控制器(OC)、应答器与道岔转辙机等部件和设备，不再使用计算机联锁(CBI)、区域控制器(ZC)等地面轨旁设备，其系统架构^[10]如图1所示。该系统在提高运营效率的基础上，较大程度地降低了系统复杂度以及信号系统建设和设备运营维护的成本。

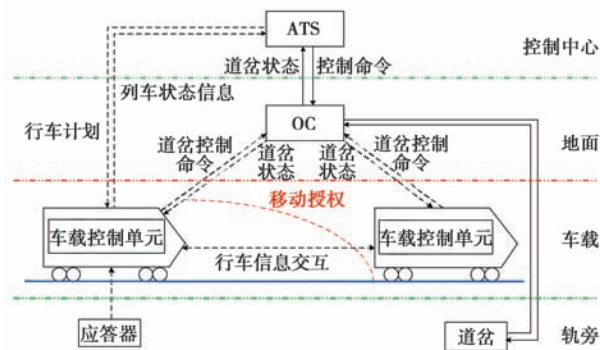


图 1 车车通信全自动无人驾驶 CBTC 系统架构
Fig.1 Architecture of the automatic unmanned operation CBTC system with train-to-train communication

1.2 控制原理

传统CBTC系统采用“以地面为中心”控制原理，其子系统种类繁多，各子系统间信息流转次数多、时

延长；同时列车移动授权由地面中心设备集中计算并分发，一旦中心设备出现故障，则会严重影响区域内所有列车的准点运营。

基于车车通信的CBTC系统采用列车与列车之间直接通信的方式来实现“以列车为中心”的自主运行控制，减轻了整个列控系统对轨旁中心设备的过度依赖，缩短了数据流转时间，控制系统实现了分布式、扁平化的控制，提高了控制系统的响应速度。其基本控制原理如下：

(1) 车载控制单元(VOBC)接收ATS下发的行车计划。

(2) OC接收其管辖范围内所有VOBC发送的列车状态信息，并将所有信息转发给域内其他列车。

(3) VOBC根据接收来自OC的其他列车状态信息，自主查询前车，并主动申请与前车建立直接通信，获取前车位置等信息。

(4) VOBC结合ATS的行车计划、前车状态等信息向OC申请道岔资源；OC根据VOBC的道岔申请，设置道岔定、反位状态；VOBC依据占用的轨道资源及前车车尾位置信息，计算移动授权(MA)并在MA范围内自主行车。

如此，实现以前车车尾位置为追踪目标点的移动闭塞。

2 车车通信 CBTC 系统列车驾驶模式

车车通信CBTC系统针对不同运营场景，提供了全自动驾驶模式(FAM)、蠕动驾驶模式(CAM)、限制自动驾驶模式(RAM)、列车自动防护(automatic train protection, ATP)系统监控下的人工驾驶模式(CM)、限制人工驾驶模式(RM)、非限制人工驾驶模式(EUM)、待机模式(STB)及休眠模式(SLP)等主要驾驶模式。FAM、CAM及RAM模式是相对传统CBTC系统新增的3种主要驾驶模式，其中FAM模式是车车通信CBTC系统VOBC所处的核心驾驶模式；CAM和RAM模式是在列车运行过程中发生某些故障后由FAM模式转入的驾驶模式。本文主要介绍这3种驾驶模式。

2.1 FAM 模式

FAM模式为在连续通信控制级别下由ATP监控的列车全自动运行模式，是全自动无人驾驶线路的主要驾驶模式，其仅当列车处于全自动驾驶区域时才能使用。在该模式下，ATP子系统计算行车许可并按行车许可保证列车的运行安全，实现在正线、车辆

段/停车场自动控制区域内的列车全自动无人驾驶运行。在 FAM 模式下,系统具备自动进/出站、自动开/关门及自动唤醒/休眠等功能。

2.2 CAM 模式

CAM 模式为车辆网络故障或车辆与车载信号设备间通信故障时的应急模式(具体故障条件由车辆确定),信号系统启动 CAM 模式需经控制中心人工确认。列车以 CAM 模式运行时,ATP 监控列车以不超过 25 km/h(可配置)的速度全自动运行;当列车以 CAM 模式进站并自动停车后,应施加紧急制动以防止列车移动,并打开车门等待人工处理。

2.3 RAM 模式

RAM 模式是列车自动运行(automatic train operation, ATO)故障下的一种自动驾驶模式。RAM 模式下,VOBC 通知车辆控制牵引,ATP 监控列车以不超过 25 km/h 的速度(可配置)运行,并在前方车站进站口停车。

3 车车通信 CBTC 系统列车驾驶模式转换方案

列车驾驶模式转换方案关系着城市轨道交通系统的运营安全和效率,因此设计一套基于车车通信的 CBTC 系统的列车驾驶模式转换方案对车车通信 CBTC 系统的工程化应用具有重要意义。本文主要对唤醒、休眠及正线运行服务这 3 种运营场景(与 FAM 模式、CAM 模式、RAM 模式转换相关)进行分析,研究具体场景下的模式转换流程。

3.1 唤醒场景模式转换

列车在车辆段内,休眠唤醒单元收到 ATS 发送的唤醒命令后,通过硬线对 VOBC 整体上电;VOBC 上电后完成自检流程,并从休眠模式转入待机模式。

处于 A 库和 B 库的前后两车的 VOBC 进入待机模式后,通过“车-车通信”方式使各 VOBC 获得对方的状态信息。此时,若 A 库的列车未进行静、动态测试,则 B 库的列车不能开启静、动态测试流程,必须等待直至收到 A 库的 VOBC 发送的静、动态测试完成的信息后,B 库的列车才能开启静、动态测试流程。

对于单列车来说,远离库门的 VOBC 首先进行静、动态测试,临近库门的 VOBC 通过首尾通信获取另一端的静、动态测试完成信息后,自动开启本端的静、动态测试流程。待临近库门的 VOBC 完成测试后,VOBC 激活驾驶室并由待机模式转为 FAM 模

式,完成列车在库内的唤醒流程。唤醒场景列车驾驶模式转换的信息交互示意如图 2 所示。

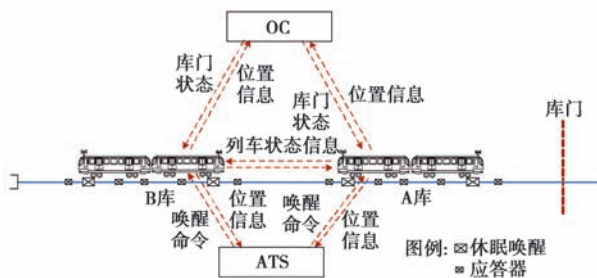


图 2 唤醒场景信息交互示意

Fig. 2 Schematic diagram of information interaction in awake scenario

3.2 休眠场景模式转换

列车在终端站台以 FAM 模式运行至车辆段内的转换轨时,列车结束正线运营服务并按照 ATS 下发的回库计划执行回库作业。VOBC 根据计划设置回库进路所涉及的道岔状态,与 OC 通信获取库门状态,通过与前车、ATS 信息交互,获取是否具备入库停车条件。当列车在库内停稳、停准后,若 ATS 判断列车具备休眠条件,则向 VOBC 发送休眠申请信息;VOBC 收到该信息后,即向 TCMS 发送休眠请求,同时 VOBC 撤销驾驶室激活指令并结束与 OC 会话;VOBC 收到 TCMS 的休眠确认后,向休眠唤醒单元发送休眠申请响应信息,随后休眠唤醒单元向 TCMS 发送休眠指令,TCMS 收到指令后对 VOBC 进行下电操作,VOBC 即由 FAM 模式转入 SLP 模式。

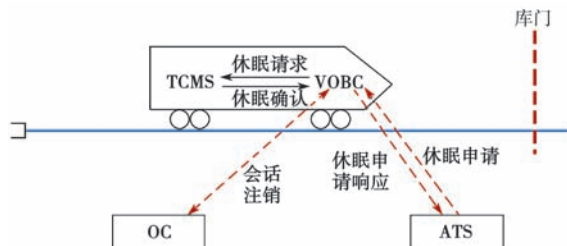


图 3 休眠场景信息交互示意

Fig. 3 Schematic diagram of information interaction in sleeping scenario

3.3 正线运行服务场景模式转换

装备有基于车车通信的 CBTC 系统的列车在正线运行时,各子系统若无故障,则 VOBC 会保持 FAM 模式不变;若出现关键设备故障情况,车载 VOBC 会转出 FAM 模式,并根据故障情况转换至相应的驾驶模式。本节主要分析 TCMS 网络故障、ATO 故障场景下的模式转换。

3.3.1 TCMS 网络故障场景模式转换

列车在全自动无人驾驶条件下,发生 TCMS 网

络故障后的模式转换（图4）流程如下：

（1）列车以FAM模式全自动无人驾驶运行，当TCMS网络与VOBC通信故障或者VOBC监测到TCMS网络的牵引或制动反馈异常（无制动重故障）时，VOBC将立即输出“紧急制动”指令。

（2）列车制动到零速后，VOBC向ATS申请由FAM模式转入CAM模式。

（3）在VOBC收到ATS的模式转换授权后，VOBC缓解紧急制动，驾驶模式转入CAM模式。

（4）列车以最高限速25 km/h运行至站台停准、停稳后，执行清客作业。

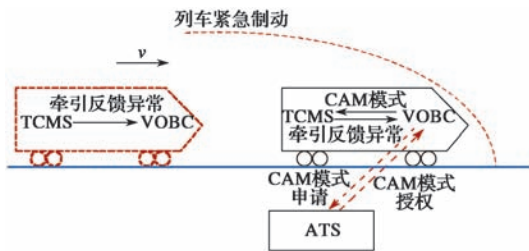


图4 TCMS故障场景信息交互示意

Fig. 4 Schematic diagram of information interaction in TCMS fault scenario

3.3.2 ATO故障场景模式转换

列车全自动无人驾驶条件下，在正线区间运行时发生ATO故障后的模式转换（图5）流程如下：

（1）列车以FAM模式运行时，ATO设备若发生故障，VOBC则立即退出FAM模式并转入RAM模式。

（2）车载VOBC通知TCMS网络控制牵引，ATP只监控列车以最高限速25 km/h运行。

（3）列车行驶至前方车站进站口停车，人工上车插入司机钥匙，VOBC由RAM模式转入CM模式，司机人工驾驶列车进站并对标停车。

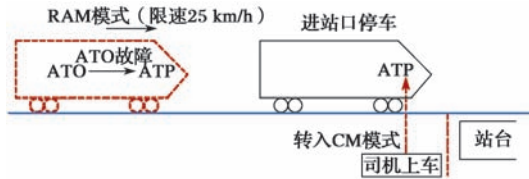


图5 ATO故障场景模式转换示意

Fig. 5 Schematic diagram of mode conversion in ATO fault scenario

4 结语

城市轨道交通列车控制系统保障列车安全快捷运营，基于车车通信的CBTC列控系统在设备无故障条件下以FAM模式运行，有效提升了线路运能。由于列车控制系统的设计遵循“故障-安全”原则，

在故障场景时，列车控制系统必须导向安全侧，并尽可能维持线路运营，不造成大面积列车延误。本文针对该问题，提出了一套模式转换方案，并对系统中关键的FAM，CAM和RAM模式转换场景进行了详细的分析研究，为将来车车通信CBTC系统的工程化奠定基础。当前，国内外相关研究机构对车车通信CBTC系统的研究虽然比较深入，但是对系统故障场景下的后备控车等级、后备驾驶模式的研究却相对欠缺，这是后续车车通信CBTC系统研究的关键技术和热点之一，也是最终实现系统工程化的重要保障。

参考文献：

[1] Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee of the IEEE Vehicular Technology Society. IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements:IEEE 1474.1-2004[S]. New York: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2004.

[2] BRIGINSHAW D. Alstom's simplified CBTC technology to debut in Lille[J]. International Railway Journal, 2013, 53(6): 29-30.

[3] 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.

[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 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.

[5] 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): 50-53.

LI L, LIN Y Z, WANG L L. Research on A New CBTC Signaling System Based on Train-to-train Communication[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(4): 50-53.

[6] WANG H, ZHAO N, NING B, et al. Safety monitor for train-centric CBTC system[J].IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(8): 931-938.

[7] 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.

[8] WANG X X, LIU L, TANG T, et al. Enhancing Communication-Based Train Control Systems Through Train-to-Train Communications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1544-1561.

[9] 郑艺, 张伟, 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.

[10] CHEN T, WANG H F, NING B, et al. Architecture Design of a Novel Train-centric CBTC System[C]//2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Singapore: the Institute of Electrical and Electronics Engineer Inc., 2018: 1-5.