

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

范永华 李 聪

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 基于车车通信的 TACS(列车自主运行系统)凭借优良的系统性能,逐渐从研发试验走向工程应用。TACS 的应用不仅要关注系统设备的高可靠性和高安全性,更应在前期设计阶段结合系统特点和线路概况,对 TACS 进行合理的系统配置,以提高系统的整体可靠性。分析了基于车车通信的 TACS 的结构组成及特点,并对 ATP(列车自动防护)子系统采用集中式或分散式结构进行了适应性分析。讨论了基于线路资源管理的列车折返设计方案,并对列车进/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。

关键词 城市轨道交通;列车自主运行系统;车车通信;区域边界管理

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.11.029

Application Scheme of Vehicle-to-Vehicle Communication Based Control System in Urban Rail Transit

FAN Yonghua, LI Cong

Abstract With excellent system performance, the vehicle-to-vehicle communication based TACS (train autonomous control system), gradually moves from R & D test to engineering application. The application of this system requires not only the high reliability and safety of the equipment, but also the importance attached to reasonable system configuration in the early design stage by combining the system characteristics and line overview, so as to improve the overall reliability of TACS. According to the structure and characteristics of TACS, the adaptability of ATP (automatic train protection) subsystem with centralized or decentralized structures is analyzed. On this basis, the design of train turnback based on line resource management is discussed, corresponding solutions to the regional boundary management when train entering and exiting the test line in automatic area are put forward.

Key words urban rail transit; train autonomous control system; vehicle-to-vehicle communication; area boundary man-

agement

Author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

城市轨道交通 TACS(列车自主运行系统)在系统研发走向具体工程应用的过程中,需要结合系统结构、功能特点及工程实际进行应用方案设计。合理的 TACS 应用方案可以提高城市轨道交通线路的运行稳定性,减少运维的工作量。近年来,基于车车通信的 TACS 作为城市轨道交通信号系统的新技术,得以迅速发展。基于车车通信的 TACS 具有结构精简、性能优良等特点,与目前广泛应用的 CBTC(基于通信的列车控制)系统同属于移动闭塞制式,但二者在系统原理和主要功能等方面均有较大差异。由此,本文针对基于车车通信的 TACS 开展应用方案研究,探讨基于车车通信的 TACS 的配置方案及关键系统方案,这对提升 TACS 在工程应用的稳定性、有效性上具有重大的意义。

1 基于车车通信的 TACS 结构设计

1.1 基于车车通信的 TACS 组成

基于车车通信的 TACS 一般由 ATS(列车自动监控)、ATP(列车自动防护)、ATO(列车自动运行)、OC(目标控制)及 DCS(数据通信子系统)等子系统组成。其中,ATP 和 ATO 设备主要包括地面资源管理设备、地面列车管理设备和车载 ATP/ATO 设备。基于车车通信的 TACS 结构组成如图 1 所示。实际工程应用中,TACS 的设备往往按属地管理原则划分为运营控制中心设备、车站设备、车辆段/停车场设备、车载设备和轨旁设备等。

基于车车通信的 TACS 具有以下结构特点:

1) 组成 TACS 的各子系统在功能上相对独立,各子系统间接口通过 DCS 实现。DCS 包括有线通

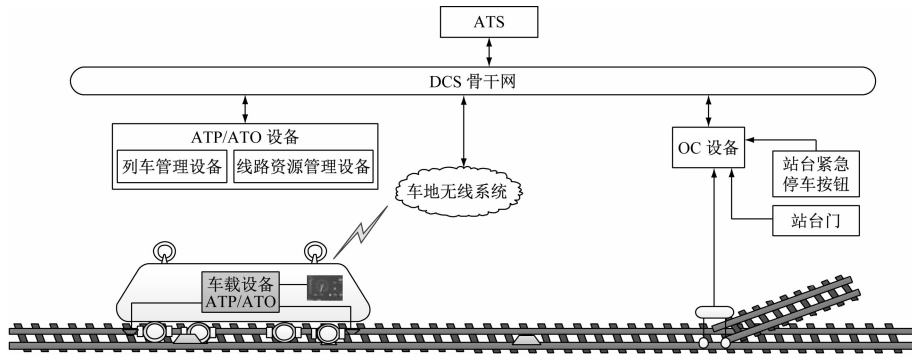


图1 基于车车通信的TACS组成示意图

Fig. 1 Diagram of vehicle-to-vehicle communication based TACS composition

信网络和车地无线通信网络两部分。

2) 车载 ATP/ATO 设备是 TACS 的核心控制设备。列车直接从 ATS 接收列车运行计划。运行路径规划、线路资源获取等均由列车自主完成。

3) 列车以 ATO 模式运行时,列车运行间隔防护通过该车与相邻列车的通信自主完成。站台门、站台紧急停车按钮、道岔等影响行车的设备均纳入地面 ATP/ATO 设备的线路资源管理设备范畴。

4) 轨旁设备不直接参与行车安全防护。地面 ATP/ATO 设备为列车提供线路资源状态信息,并响应列车的线路资源申请需求。OC 设备采集轨旁设备状态,提供电源驱动。地面设备的可靠运行是列车运行的基础,地面设备对于线路的管理效率直接影响线路的通过能力。

1.2 ATS 子系统结构

ATS 子系统主要负责行车计划管理及列车运行监控,其设备按设置区域可分为中央级设备和车站级设备。

在 TACS 中,列车运行计划安排到列车运行路径规划的全过程均由列车自主完成,ATS 在此环节中只负责下发列车运行计划,而 ATS 中仅中央级设备具备列车运行计划的编制和下发功能,因此 TACS 的线路控制模式为中央控制模式。即:ATS 中仅中央级设备具备运营指挥功能,车站级设备用于轨旁设备状态监控和列车管理。

基于 TACS 采用中央控制模式的特点,为提高 ATS 设备在故障场景下的可用性,在线路无备用运营控制中心时可考虑在正线或车辆段/停车场内增加线路控制级 ATS 设备(以下简称“线控级 ATS 设备”)。图 2 为 ATS 子系统的结构示意图,线控级 ATS 设备与中央级 ATS 设备构成异地冗余。线控级 ATS 设备可配置调度员工作站、应用服务器和数

据库服务器,其功能与中央级 ATS 设备相同。通过操作权限管理可实现中央级 ATS 设备和线控级 ATS 设备的控制权限切换。

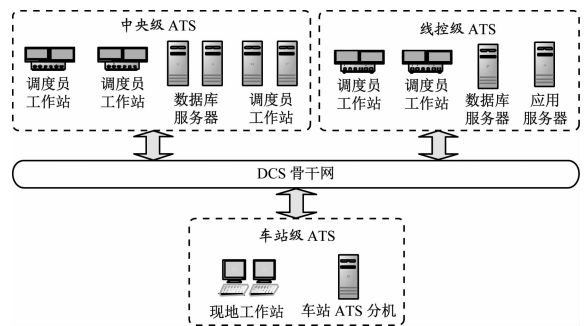


图2 ATS子系统结构示意图

Fig. 2 Diagram of ATS subsystem structure

不考虑异地冗余时,ATS 的关键设备已采用双机热备的冗余方式。考虑异地冗余后,线控级 ATS 设备实际上是在原有双机热备冗余基础上再额外增加 1 套热备冗余。而更有效的方式则是在系统设计和产品设计阶段优化 ATS 设备的冗余架构,以直接提升 ATS 的可靠性。

1.3 地面 ATP/ATO 子系统和 OC 子系统结构

地面 ATP/ATO 设备主要包括线路资源管理设备和列车管理设备两部分。其中:线路资源管理设备主要对线路资源进行管理,结合车载设备实现线路资源的分配和回收;列车管理设备主要用于列车资源管理。这两部分设备的功能相结合,可实现对非通信列车的管理。

OC 设备是资源管理的执行设备,为线路资源管理设备提供转辙机、紧急停车按钮等室外设备状态信息,并响应线路资源管理设备的控制命令。考虑到 OC 设备对室外设备的采集和驱动一般通过硬线实现,为提高设备控制的效率,OC 设备通常设置

在具备折返功能的有岔车站内。OC 设备与线路资源管理设备间的通信采用网络接口。根据线路资源管理设备的结构方式,线路资源管理设备和 OC 设备可以采用集中式结构或分散式结构。

1.3.1 集中式结构

集中式结构下,全线的 OC 设备均由 1 套线路资源管理设备进行管理,如图 3 所示。集中式结构对于线路资源管理设备的性能要求较高,其特点是设备精简、系统内部的接口数量较少、便于对 OC 设备进行集中管理。

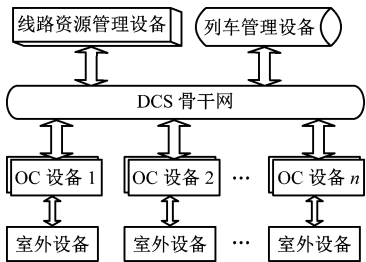


图 3 采用集中式结构的 ATP 子系统架构示意图
Fig. 3 Diagram of ATP subsystem architecture with centralized structure

1.3.2 分散式结构

分散式结构在 OC 设备管理区域内进一步细分线路资源管理区域,根据城市轨道交通线路的长度或室外设备的数量,将 1 个车站或相邻多个车站的 OC 设备管理区域纳入 1 个线路资源管理区域予以管理。如图 4 所示,线路资源管理设备 1 的管辖范围为 OC 设备 1 的管理区域,线路资源管理设备 2 的管辖范围包括 OC 设备 2 及 OC 设备 3 的管理区域。分散式结构中相邻线路资源管理设备间通过 DCS 骨干网进行通信,单个线路资源管理设备故障影响范围小,具有良好的可扩展性。

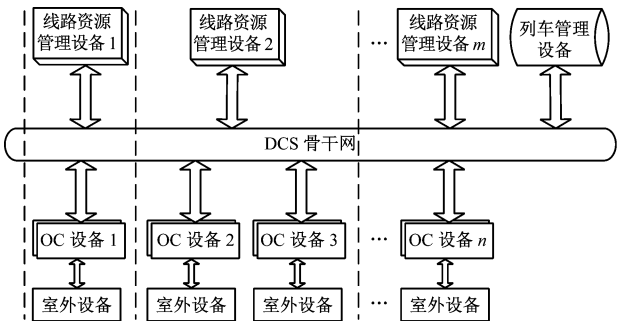


图 4 采用分散式结构的 ATP 子系统架构示意图
Fig. 4 Diagram of ATP subsystem architecture with decentralized structure

线路资源管理设备在工作过程中需实时与

ATS 设备、OC 设备及车载设备进行信息交互。与集中式结构相比,分散式结构分担了信息处理量,有利于设备长期保持高性能的工作状态。同时,在 TACS 优化升级或设备故障重启过程中,采用分散式结构的 OC 子系统对运营的影响较小,有利于提升 TACS 的整体可靠性。

2 TACS 关键技术方案

2.1 基于线路资源管理的列车折返

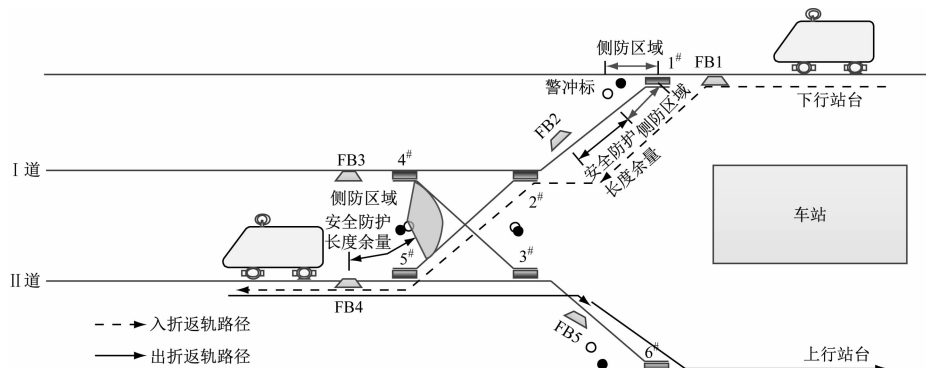
线路折返能力是衡量基于车车通信的 TACS 能力的关键指标。在既定的线路条件和列车参数下,若忽略列车停站时间的影响,则制约列车折返能力的因素主要包括线路资源申请过程中的线路资源准备时间和线路资源占用时间。线路资源准备时间和线路资源占用时间与列车的折返方式及 TACS 折返策略有关。一般情况下,与站前折返相比,站后折返因存在站后折返线,需要的线路资源占用时间较少。无论是采用站前折返还是站后折返,TACS 对于线路资源处理的基本逻辑是一致的,本文仅以站后折返为例进行分析。

采用站后折返方式时,其流程可分为 3 个环节:①列车从上行/下行站台驶入折返轨;②列车在折返轨停稳后实施换端作业;③列车驶出折返轨,进入下行/上行站台。图 5 为基于线路资源管理的站后双折返线折返模式,相邻列车分别利用 2 条不同的折返轨(I 道、II 道)进行折返。

如图 5 所示,基于线路资源管理的列车站后折返作业具体为:

1) 前行列车(以下简称“前车”)在由下行站台驶入 II 道的过程中,首先向线路资源管理设备申请下行站台到 II 道的线路资源(1[#]—5[#]道岔及相应的道岔区域、II 道折返轨)。列车获取线路资源后,前车车载设备进行自主移动授权计算,授权前车从下行站台驶入 II 道折返轨。

2) 前车出清站台端部 FB1 后,前车自动释放下行站台线路资源,后行列车(以下简称“后车”)获取下行站台线路资源后驶入下行站台等候折返。当前车出清 FB2 时,前车自动释放 1[#]道岔的相关线路资源,后车可申请 1[#]道岔线路资源并进入该道岔区域。FB2 位于 1[#]道岔警冲标的内方,其与 1[#]道岔的距离等于侧防区域长度与安全防护长度余量之和。其中,安全防护长度余量包括应答器天线到车钩距离、列车定位误差长度等。



注:FB1、FB2、FB3、FB4、FB5 均为应答器;侧面冲突防护简称为“侧防”;1#表示道岔编号,其余表述类同。

图 5 基于线路资源管理的站后双折返线列车折返路径示意图

Fig. 5 Train turn-back path of double turn-back line after the station based on line resource management

3) 前车出清 FB4 后,后车申请进入 I 道的线路资源并驶入 I 道。FB4 距离扇形侧防区域的安全防护长度余量与 FB2 一致。前车出清 FB4 后将自动释放 2#道岔和 4#道岔的相关线路资源。

4) 前车换端完成后,向线路资源管理设备申请驶出折返轨的线路资源。前车出清 FB4 后,后车在 I 道完成换端作业即可提前申请 3#道岔和 5#道岔的相关线路资源。

对于采用 CBTC 系统的城市轨道交通线路,其应答器通常设置在道岔区域的各个入口处,即将岔区与线路资源作为 1 个整体进行管理。通过分析道岔区域的侧防范围,在侧防长度满足要求的情况下,通过在岔区增加应答器(如 FB2、FB5)的方式,对岔区线路资源进一步细分,以提高道岔资源的管理效率。

经过对 TACS 能力进行仿真测算,图 5 所示的站后折返线型在采用弯进直出折返方式时线路最小折返时间可达到 96 s,而采用 CBTC 系统的线路在相同折返模式下的最小折返时间为 120 s,由此, TACS 基于线路资源管理的列车折返效率可提升 20% 左右。基于线路资源管理的列车折返模式通过对道岔区域线路资源的进一步细分,结合列车在岔区的精确定位,可实现道岔资源的精细化管理,缩短线路资源占用时间,进而达到提升列车折返效率的目的。

2.2 区域边界管理

2.2.1 列车进/出自动化区域

城市轨道交通范围内的非自动化区域通常为人工作业区,如车辆段/停车场内的非自动化区域为工程车库线、材料装卸线及线路间的联络线等。列车在非自动化区域内采用人工驾驶模式运行。

在非自动化区域和自动化区域的边界设置转换轨,用以提供列车控制级别升级和驾驶模式转换的条件。

在基于车车通信的 TACS 模式下,列车在自动化区域内采用 ATO 运行,不需要依赖地面设备来检测列车的位置信息,列车位置完全由列车自主定位获取,因此,列车可自主完成线路资源的申请和释放。而在非自动化区域内,由于 ATO 不可用,列车为非通信列车,一般通过降级设备或人工确认的方式获取位置信息,此时列车管理设备根据非通信列车的运行任务和列车位置信息为非通信列车申请/释放线路资源。

如图 6 所示,在转换轨进入非自动化区域侧设置信号机 X1,用以指示非通信列车运行。在非自动化区域进入转换轨侧设置信号机 S1,以确保转换轨安全。在转换轨内设置多个应答器(FB1—FB3),用于满足列车控制级别升级和驾驶模式转换过程中对列车定位和轮径校正等功能需求。为满足 ATO 模式下列车的停车需求,转换轨的长度不应小于列车车长和 ATO 停车长度余量之和。

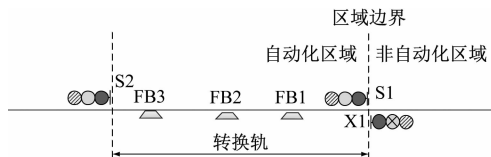


图 6 列车进/出自动化区域转换轨平面布置示意图

Fig. 6 Layout of train entry/exit transfer track in automation area

列车由自动化区域进入非自动化区域时,以 ATO 模式运行到转换轨处并停车。从线路资源管理设备获取非自动化区域内线路资源后,OC 子系统开放转换轨进入非自动化区域的信号机 X1,司机

将列车运行模式切换到人工驾驶模式,并将列车驶入非自动化区域内。列车由非自动化区域进入自动化区域时,经列车管理设备获取自动化区域内转换轨线路资源后,OC 子系统开放进入转换轨的信号机 S1,列车在转换轨完成初始化定位后进入 ATO 模式。S2 信号机位于转换轨的另一端,用于指示非通信列车在自动化区域内运行。

2.2.2 列车进/出试车线

与自动化区域和非自动化区域边界有所不同,试车线一般位于车辆基地内,其信号系统与车辆基地信号系统相互独立。试车线范围内的线路资源不能同时由车辆基地信号系统管理,因此,列车进/出试车线时需要进行控制权限切换。为保证 TACS 控制范围的连续性,信号控制的分界点(以下简称“分界点”)可设置在车辆基地线路与试车线的联络线上。图 7 为典型列车进/出试车线时的信号机设置方式,信号机 X 内方为试车线信号系统的管辖范围,信号机 S 内方为车辆基地信号系统的管辖范围。

如图 7 所示,车辆基地 ATS 系统根据试车计划为测试车下发运行至分界点的运行任务,并设定分界点往车辆基地线路方向为自动化区域。若测试车为通信列车,则命令列车根据运行任务自主运行至分界点信号机 X 前停稳。若测试车为非通信列车,则由人工驾驶列车至分界点信号机 X 前停稳。试车线信号系统为处于分界点待命的测试车准备进入试车线的线路资源,资源分配后开放信号机 X。司机根据信号机指示,驾驶测试车进入试车线站台。此时,车辆基地对测试车的控制权限完全移交给试车线信号系统。

至分界点信号机 S 前停稳。车辆基地 ATS 系统为测试车准备由分界点至车辆基地转换轨的线路资源。资源分配后信号机 S 开放,列车进入车辆基地转换轨。此时,试车线释放线路资源,测试车的控制权限移交给车辆基地信号系统。

3 结语

基于车车通信的 TACS 的应用重点在于扬长避短,一方面通过合理的系统配置提升系统的整体可靠性,降低设备故障对运营的影响,使系统长期工作在正常的运行状态下;另一方面通过细分线路资源管理区域,发挥 TACS 资源管理的高效性,并通过优化 TACS 边界管理提升系统在降级运行区域的可用性。本文结合基于车车通信的 TACS 结构及特点,针对其在应用过程中重点关注的问题进行研究,并探讨了相应的解决方案,可为 TACS 的实际应用提供一定借鉴和参考。

参考文献

- [1] 郇春海,刘波,简锐锋,等.新一代城轨信息化体系中 ATS 系统发展[J].都市轨道交通,2018(4):77.
GAO Chunhai, LIU Bo, JIAN Ruifeng, et al. Discussion on the development of an ATS system in the new generation information system of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018(4):77.
- [2] 徐意.城市轨道交通线路折返能力分析 & 优化措施[J].铁道运输与经济,2017(3):96.
XU Yi. Analysis on turnaround capacity of urban rail transit line and its optimization measures[J]. Railway Transport and Economy, 2017(3):96.
- [3] 董松.信号系统提升车站折返能力的研究[J].铁道通信信号,2019(1):70.
DONG Song. Research on signal system improving the turn-back capability of station[J]. Railway Signalling & Communication, 2019(1):70.
- [4] 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.
- [5] 邢小燕.基于分布式计算机网络数据结构的分析与优化[J].通信电源技术,2020(12):168.
XING Xiaoyan. Analysis and optimization based on distributed computer network data structure. Telecom Power Technology, 2020(12):168.

(收稿日期:2022-04-10)

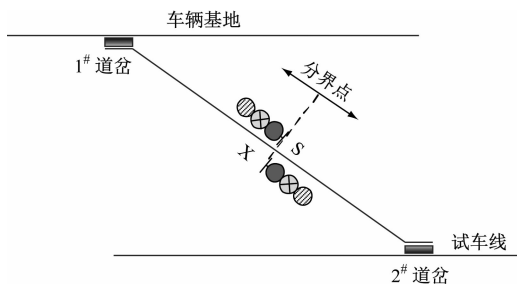


图 7 列车进/出试车线平面布置示意图

Fig. 7 Layout of train entry/exit test line

试车结束后,试车线信号系统为测试车办理至分界点的线路资源,资源分配后司机人工驾驶列车