

基于车车通信的 CBTC 系统关键技术研究

徐启禄

(青岛地铁集团有限公司, 266100, 青岛//高级工程师)

摘要 介绍了基于车车通信的 CBTC(基于通信的列车控制)系统的应用现状。对比分析了基于车地通信和基于车车通信的 CBTC 系统的系统架构与控制理念的差异,重点阐述了基于车车通信的 CBTC 系统的技术特点。伴随着通信技术稳定性及可靠性的提升,更加具有分布式特点的基于车车通信的 CBTC 系统将会成为未来城市轨道交通信号系统发展方向之一。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 车车通信; 车地通信

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.05.026

Key Technology Research on CBTC System Based on Vehicle-vehicle Communication

XU Qilu

Abstract The current application status of CBTC (Communication Based Train Control) system based on vehicle-vehicle communication was introduced. The differences of system architecture and control concept between CBTC system based on vehicle-ground communication and that based on vehicle-vehicle communication were compared and analyzed. The technical characteristics of CBTC system based on vehicle-vehicle communication were emphatically demonstrated. With the communication technology stability and reliability improving, CBTC system based on vehicle-vehicle communication possesses more distributional characteristics and will become one of the development directions for urban rail transit signal system in the future.

Key words urban rail transit; signal system; vehicle-vehicle communication; vehicle-ground communication

Author's address Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266100, Qingdao, China

基于车车直接通信的 CBTC(基于通信的列车自动控制)系统将成为城市轨道交通下一代信号系统的发展方向之一。车车通信具有更精简的轨旁设备、更为灵活的操作方式、更短的行程间隔以及更低的采购和维护成本。本文介绍了车车直接通

信的 CBTC 系统的关键技术和解决方案。

1 基于车车通信的 CBTC 系统的应用现状

目前国内尚未有真正的基于车车通信的 CBTC 系统的应用案例,法国里尔地铁的改造项目应用了该技术。法国里尔地铁 1 号线项目,2010 年开始研发基于车车通信的 CBTC 技术,2013 年开始进行信号系统改造,最初预计 2016 年初投入商业运营,但由于土建和技术原因已延误 3 年,预计列车运营间隔为 66 s。法国里尔地铁 1 号线全长 13.5 km,设有 18 座车站,运营列车 80 列,该线路是全球第一条由基于轨道电路的 UTO(无人驾驶)改造为基于无线车车通信的 UTO 线路,改造后其运输能力将增加一倍。该线路的信号系统将道岔、轨道区段等都视为轨道资源,遵循以“资源管理”为核心和以列车为中心的管理原则,所有车辆的运行都被理解为对轨道资源的征用和释放,先进先出。

2 基于车地通信与基于车车通信的 CBTC 系统差异分析

1) 基于车地通信的 CBTC 系统。该系统主要包括中心的 ATS(列车自动监视)设备、ZC(区域控制器)、车载设备、联锁和室外转辙机、信号机、信标等。目前国内基于车地通信的 CBTC 系统主要分为两类:一类是以联锁进路为核心的 CBTC 系统,由 ATS 下发进路请求至联锁,联锁控制室外设备,并将状态反馈给 ZC,同时 ATS 将列车运行信息下发给 ZC,最后 ZC 计算移动授权发送给车载设备,控制流程如图 1 所示;另一类则是以移动授权为核心的 CBTC 系统,ATS 首先将进路请求下发给 ZC, ZC 会将进路请求信息下发给联锁,并从联锁获取道岔和信号机等设备状态信息,同时接收所控区域内的车辆发送的位置信息,根据各列车位置信息以及道岔、信号机的状态信息下发给车载设备移动授权,控制流程如图 2 所示。

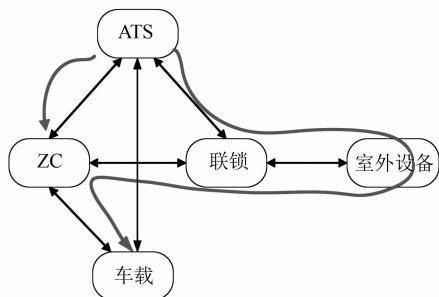


图1 以联锁进路为核心的CBTC系统控制流程

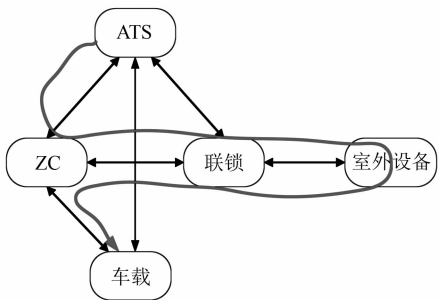


图2 以移动授权为核心的CBTC系统控制流程

2) 基于车车通信的CBTC系统。该系统取消了ZC和联锁设备,所有的轨旁设备由OC(对象控制器)进行控制;由ATS直接下发运行信息给车载设备,车载设备与相邻列车进行直接通信,各列车发送各自的位置信息,并获取前车的位置信息,计算自身的移动授权距离;当列车行驶到道岔附近时,申请对道岔所对应的OC进行控制,获取控制权。这种方法更好地体现了以列车为中心的原则,由列车直接对轨旁设备进行控制,控制流程如图3所示。

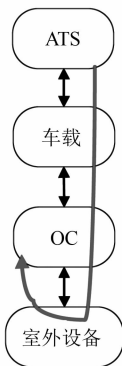


图3 基于车车通信的CBTC系统控制流程

3) 移动授权和响应时间差异分析。由两种系统的架构不难看出:基于车地通信的CBTC系统,车载ATC(列车自动控制)需要周期性地与轨旁ATC进行通信,由区域控制器进行移动授权;而基

于车车通信的CBTC系统,则仅需要进行车与车之间的直接通信,响应时间更快,同时对于轨旁设备,也只需要在列车接近时与其进行通信。两种系统的移动授权和通信方式如图4所示。

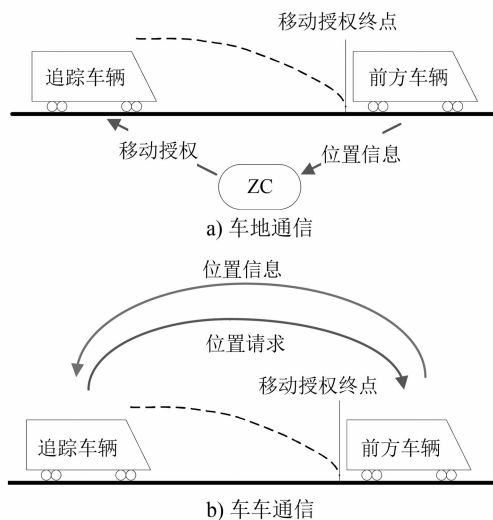


图4 基于车地通信与基于车车通信的CBTC系统移动授权与通信方式

通信方式和架构理念的改变,使得基于车车通信的CBTC系统在缩短追踪间隔的同时具有更高的灵活性,可以实现对向运行和反向运行,大大提升了运行性能。基于车地通信的CBTC系统,VOBC(车载控制器)与ZC通信的周期为 T_1 (500 ms),ZC处理的运算周期为 T_2 (100 ms),因此从获取前一列车的车辆位置,到后一列车获取移动授权的时间间隔 $T_{车地}$ 为 $1.1\text{ s}(T_1+T_2+T_1)$;而基于车车通信的CBTC系统所需的获取移动授权的时间间隔 $T_{车车}$ 仅为 $0.6\text{ s}(T_1+T_2)$ 。

基于车车通信的CBTC系统,如果前行列车以 100 km/h (27.8 m/s)的最大运行速度行驶,列车追踪时间间隔为 0.5 s ,则将缩短 13.9 m 的追踪距离(假设前行列车的位置不确定性不增加)。

基于车地通信的CBTC系统,其联锁理念将面临新的挑战,在确保安全的情况下,基于车车通信的CBTC系统将不再基于联锁进路。列车在两种信号系统下的过道岔方式和折返方式分别如图5和图6所示。

由图5和图6可见:在基于车地通信的CBTC系统中,列车T2必须要等待列车T1的占用完全出清后才能驶入道岔区间;而基于车车通信的CBTC系统打破了传统的联锁逻辑,可以更早地控制转动

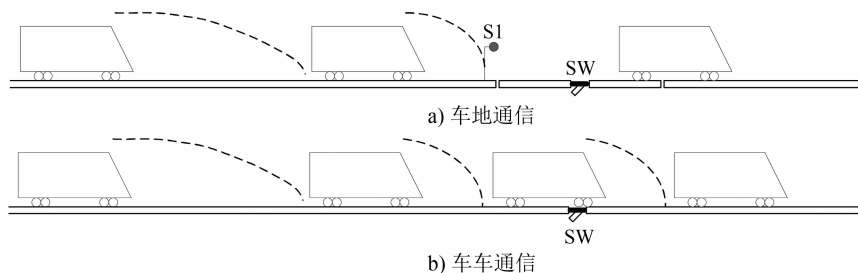


图 5 基于车地通信与基于车车通信的 CBTC 系统下的列车过道岔方式

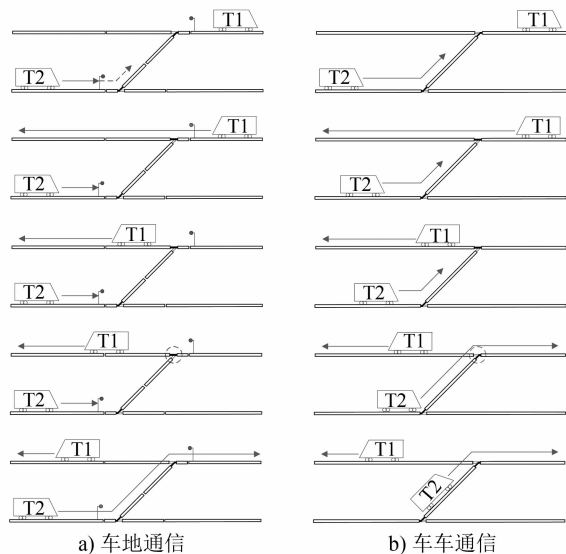


图 6 基于车地通信与基于车车通信的 CBTC 系统下的列车折返方式

道岔,这无疑将会提升折返能力。

3 基于车车通信的 CBTC 系统关键技术

3.1 管理方式

由基于车车通信的 CBTC 系统的架构方式可以看出,车载系统将直接与 ATS 中心、OC 控制器直接通信。其通信主要内容有:共享列车自身位置和状态信息,获取运行信息,获取其余列车信息,以及共享列车自身维护信息等;列车从出入段线,由场段驶向正线时,将首先与 ATS 通信,获取当天的运行计划,并将自身信息在控制中心登记,同时获取全线其余列车的位置信息;之后车载系统根据所映射的线路地图,与前车进行周期性通信,若前车发生丢失或通信中断,将再次向控制中心发出查询全线信息申请并 EB(紧急制动),直到确认前方线路信息后,再次运行;当列车驶离正线时,通知控制中心注销车辆信息。

列车与前车建立通信的过程,存在着 3 种不同

的管理方式:①与由中心 ATS 指定的前车进行通信;②ATS 只发送所有列车位置信息,由车载系统自行判断前车,并与其进行通信;③车载系统通过独立的安全网络与全线所有列车进行通信,共享所有车辆的位置信息。第一种管理方式,实际上还是有 ATS 负责全线的信息,相当于将 ZC 的部分功能上移至 ATS 中,未能实现分布式的管理方式,一旦 ATS 故障将造成对全线的影响;第二种方式,增强了车载的自行判断能力,即使在单点 ATS 控制中心故障的情况下,仍能实现运营,对信号系统的风险也较小;第三种方式最为直接,但是增大了网络的承载,存在着网络风暴的可能性。

3.2 道岔控制

对于道岔的控制是确保行车安全的根本。对于基于车车通信的 CBTC 系统来说,可分为车车通信广义与狭义两种。广义上的车车通信,只要是车与车进行直接通信即可。由 ATS 下发进路信息给车载设备和 OC,车载设备互相通信,计算各自的移动授权,OC 根据车辆的位置与预期进路信息对道岔设备等进行控制。实际上此种方法虽然字面上实现了车车通信,但对轨旁控制的核心逻辑仍然在 OC 控制器上,这无疑增加了 OC 设备的计算量与成本。

狭义上的车车通信则是更加扁平化的管理方式,对于轨旁设备直接由车载设备通过 OC 进行控制,列车接近道岔区段时,会申请对道岔所对应的 OC 控制器的控制权;取得控制权后,会根据所需运行信息对道岔进行定位操作或反位操作并进行锁闭;列车通过后释放控制权,OC 控制器在注册表中变成未分配状态。这种方式更加符合“以列车为中心”的思想。

由于不再具有联锁设备,因此容易出现道岔死锁的情景,这就需要在系统中提前设置,由 OC 来进行场景判断,避免死锁情景的发生。同时对于道岔

的控制,将遵循“先进先出”原则,先于 OC 控制器建立通信列车,在注册表中获取控制权后,列车将优先使用道岔。

在此基础上,还需要考虑道岔所属 OC 控制器的通信建立时机。如果过早建立通信将影响运营

效率;若是通信建立过晚,则可能存在道岔未锁闭时列车驶入的情况,这将造成车辆脱轨或者挤岔。

根据 IEEE 1474 的标准制动模型考虑其最坏情况下制动情况,车载设备控制道岔所需的最短距离如图 7 所示。

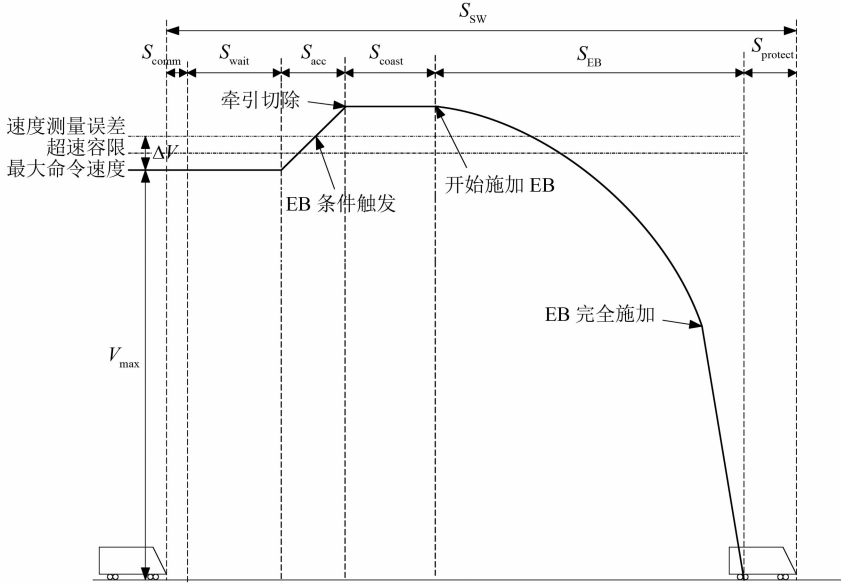


图 7 基于车车通信的 CBTC 系统车载设备控制道岔所需的最短距离

由图 7 可知,车载设备控制道岔所需的最短距离为:

$$S_{SW} = S_{comm} + S_{wait} + S_{acc} + S_{coast} + S_{EB} + S_{protect}$$

式中:

S_{comm} ——车载设备与 OC 设备建立通信时间所需的距离;

S_{wait} ——OC 设备移动道岔和反馈时间所需的距离;

S_{acc} ——最不利情况下的车载失控加速阶段所需的距离;

S_{coast} ——车载牵引力切除到开始紧急制动的情形距离;

S_{EB} ——列车紧急制动所行驶的距离;

$S_{protect}$ ——防止过冲的额外防护距离。

其中:

$$1) S_{comm} = V_{max} T_{comm}$$

式中:

V_{max} ——线路允许的最大列车运行速度;

T_{comm} ——车载设备与 OC 建立的通信时间,通常建立通信时间为 500 ms。

$$2) S_{wait} = V_{max} T_{wait}$$

式中:

T_{wait} ——OC 设备移动道岔和反馈时间,通常假定为 8 s (7 s 移动时间+1 s 信号处理时间)。

$$3) S_{acc} = V_{max} T_{acc} + a_{acc} T_{acc}^2 / 2$$

式中:

a_{acc} ——列车最大失控加速度;

T_{acc} ——列车失控加速阶段的运行时间。

$$4) S_{coast} = (V_{max} + a_{acc} T_{acc}) T_{coast}$$

式中:

T_{coast} ——车载紧急制动继电器落下到列车开始实施紧急制动的的时间间隔。

$$5) S_{EB} = \int_0^t [(V_{max} + a_{acc} T_{acc}) - \int_0^t a_{EB}(t) dt] dt + \frac{[(V_{max} + a_{acc} T_{acc}) - \int_0^t a_{EB}(t) dt]^2}{2 \int_0^t a_{EB}(t) dt}$$

式中:

$a_{EB}(t)$ ——紧急制动率随时间的变化加速度,通常假设紧急制动过程由 0% 到 90% 所需时间为 1.53 s。

为了确保安全,同时又能兼顾效率,当列车与道岔距离为 S_{SW} 时,才会与 OC 设备进行通信,否则

道岔将禁止车辆通过。

3.3 降级下的运行风险

基于车地通信的 CBTC 系统配置有一套联锁设备,可用于当列车进入降级模式下或出现非通信列车时使用,通过联锁确定列车位置,为列车办理进路,控制道岔,通过信号机确保行车的安全。但是对于基于车车通信的 CBTC 系统而言,在取消了联锁设备的情况下如何避免降级运行下的风险将是车车通信的难点所在,目前的一些主要的解决思路如下:

1) 增加系统的冗余度,从而提高系统的可靠性。目前有一些信号系统供应商所提出的 CBTC2.0 系统具有一定的借鉴意义。该系统取消了联锁后备的模式,采用了以 CBTC 备份 CBTC 的理念,确保了故障情况下,在不影响 CBTC 系统正常使用的同时,可以对设备进行维护。对于基于车车通信的 CBTC 系统而言,DCS(数据通信系统)子系统可靠性对运行的稳定性的影响将增大,因此可以采用 LTE(长期演进)+WLAN(无线局域网)技术,做到双重网络的多重冗余;对于车载系统也可以采用 2X2oo3 的冗余架构;在控制中心除了主用控制中心的冗余外,还可以增加热备的备用控制中心,增强系统的可靠性。笔者认为在发生故障的情况,往往重启和维护既有系统状态所消耗的时间和风险远远小于降级运营所需要的时间与风险。

2) 基于物联网 RFID(射频识别)技术的次级监测系统。为防止发生列车位置信息丢失的情况,可在车辆上预装 RFID 设备,在轨旁安装读卡器设备,当车辆通过读卡器后,读卡器将车辆的信息发送给控制中心,控制中心根据读卡器所提供的位置信息和车辆的 ID 信息,在系统中“伪造”一个列车位置信息,从而实现不同模式列车的混跑。目前 RFID 技术已经应用于德国慕尼黑火车进站的定位系统中,并在 ETCS(欧洲列车控制系统)中作为列车定位的辅助技术。

3) 自主化列车控制。传感器技术的不断发展,也为自主化列车控制带来了可能。列车的自主化控制是人工智能的一种特定应用,基于数据和模型

驱动的人工智能技术能够为列车自主化控制提供可信的思考和决策。基于环境感知的列车主动控制将为降级模式下提供主动式的运行防护。除了传统的定位方式外,自主化列车控制将基于多元信息融合的列车自主定位技术,包括基于卫星导航的虚拟应答器技术、基于地基增强系统定位技术、惯性定位技术以及多传感器融合技术,实现多数据融合的主动定位,既增强了系统定位的冗余度,同时避免了被动定位对于轨旁的依赖。在智能感知方面,也将采用基于视觉的传感器、毫米波和激光雷达等,实现对前方障碍物的确认与检测。

4 结 语

城市轨道交通信号系统的发展永远是基于时代的需求和当代技术的发展。从最初的电话闭塞,到基于轨道电路的固定闭塞,再到基于环线的移动闭塞,但此时仍受限于车载计算机的运行能力,移动授权车辆速度控制仍然由中心控制;直到基于跳频技术的车地通信技术的出现,才彻底摆脱了车地通信量的束缚,车载计算机能力也得到了大幅度的提高,这无疑使信号系统进入了现在的基于无线通信的移动闭塞阶段。伴随着通信技术稳定性、可靠性的提升,更加具有分布式特点的基于车车通信的移动闭塞系统将会成为未来城市轨道交通信号系统发展方向之一。

参考文献

- [1] 徐纪康,贾森,许琰.基于车车通信的新型 CBTC 系统中的道岔控制功能研究[J].铁路通信信号工程技术,2017(3): 47.
- [2] 王枫博,冯书玲.基于车车通信的 CBTC 系统关键技术研究[C]//第五届全国智慧城市与轨道交通科技创新学术年会论坛.青岛:中国城市科学研究会数字城市专业委员会轨道交通学组,2018.
- [3] 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.
- [4] 夏庭楷,崔科.城市轨道交通下一代 CBTC 系统发展展望[J].城市轨道交通研究,2018(5): 50.
- [5] 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.

(收稿日期:2019-08-20)